

**В.А. Богуш, Т.В. Борботько, А.В. Гусинский,
Л.М. Лыньков, А.А. Тамело**

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ



Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ”**

Научно-исследовательская часть

**В.А. Богуш, Т.В. Борботько, А.В. Гусинский,
Л.М. Лыньков, А.А. Тамело**

**Электромагнитные излучения.
Методы и средства защиты.**

Под редакцией
профессора, д-ра техн. наук *Л.М. Лынькова*

**Минск
Бестпринт
2003**

Рецензент: зам. зав. кафедры электроники Военной Академии Республики Беларусь, канд. техн. наук А.В. Хижняк

Э 45 **Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты** / В.А. Богуш, Т.В. Борботько, А.В. Гусинский и др.; Под ред. Л.М. Лынькова. – Мн.: Бестпринт, 2003.-406 с. ил.: 173.

ISBN 985-6722-32-2.

Рассмотрены основные источники электромагнитного излучения антропогенного и естественного происхождения и приведены характеристики излучаемых полей. Даны основные инженерно-технические методы и средства защиты от полей радиочастот. Определены принципы конструирования электромагнитных экранов. Приводятся оригинальные технологии изготовления трикотажных экранирующих полотен с гладкой и рельефной формой поверхности и методики измерения их характеристик. Описаны области применения гибких экранов электромагнитного излучения.

Для инженерно-технических и научных работников различных отраслей промышленности (приборостроительной, радиотехнической и других), связи и медицины, а также для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей радиотехнических специальностей вузов.

В работе над монографией принимали участие доктор техн. наук, профессор Л.М. Лыньков, канд. техн. наук В.А. Богуш, аспирант Т.В. Борботько. Раздел 1.4.2 написан к.т.н., доцентом А.А. Тамело; раздел 5 написан к.т.н., доцентом А.В. Гусинским.

Рекомендована Советом БГУИР, протокол №1 от 26.09.2002.

| | |
|--|-----------|
| Условные обозначения..... | 9 |
| Введение..... | 11 |
| 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... | 13 |
| 1.1. Возбуждение электромагнитного излучения..... | 13 |
| 1.2. Кооперативное действие электромагнитных полей..... | 15 |
| 1.3. Источники электромагнитного излучения..... | 16 |
| 1.3.1. Природные источники электромагнитного излучения..... | 18 |
| 1.3.2. Антропогенные источники электромагнитного излучения..... | 19 |
| 1.3.2.1. Электропроводка..... | 19 |
| 1.3.2.2. Линии электропередач..... | 21 |
| 1.3.2.3. Бытовые приборы..... | 24 |
| 1.3.2.4. Персональный компьютер..... | 28 |
| 1.3.2.5. Электротранспорт..... | 39 |
| 1.3.2.6. Сотовая связь..... | 40 |
| 1.3.2.7. Теле- и радиостанции..... | 48 |
| 1.3.2.8. Спутниковая связь..... | 50 |
| 1.3.2.9. Радиолокационные системы..... | 51 |
| 1.3.2.10. Электромагнитное оружие..... | 52 |
| 1.4. Взаимодействие электромагнитного излучения с биологическими объектами..... | 54 |
| 1.4.1. Взаимодействие электромагнитного излучения с организмом человека. Эффект малых доз..... | 57 |
| 1.4.2. Влияние электромагнитного излучения на живые организмы и растения..... | 62 |
| 1.4.2.1. Воздействие электромагнитных излучений на адаптивные функции гомеостаза у живых организмов..... | 62 |
| 1.4.2.2. Воздействие электромагнитных излучений на биологические функции животных..... | 66 |
| 1.4.2.3. Воздействие электромагнитных полей на растения..... | 69 |
| 1.4.2.4. Гипотеза о воздействии электромагнитной волновой терапии (Т-терапии)..... | 75 |
| 1.4.2.5. Качество секрета молочной железы и биохимического состава крови при лечении мастита у коров с помощью Т-терапии..... | 78 |
| 1.4.3. Основные нормы допустимых уровней воздействия электромагнитных полей..... | 83 |
| 2. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ..... | 88 |
| 2.1. Инженерно-технические методы и средства..... | 88 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 2.2 | Организационные и лечебно-профилактические мероприятия..... | 92 |
| 2.3 | Измерительное и метрологическое оборудование..... | 94 |
| 2.3.1. | Измерители электростатического потенциала..... | 94 |
| 2.3.2. | Измерители напряженности электростатического, магнитного и электрического полей..... | 96 |
| 2.3.3. | Измерители электромагнитного поля..... | 102 |
| 2.3.4. | Анализаторы поля..... | 103 |
| 2.3.5. | Радиолюбительские конструкции..... | 105 |
| 2.3.5.1. | Простой детектор радиоволн..... | 105 |
| 2.3.5.2. | Детектор поля со звуковой сигнализацией и регулировкой чувствительности..... | 106 |
| 2.3.5.3. | Малогобаритный детектор поля с индикацией на светодиодах..... | 107 |
| 3. | МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ..... | 109 |
| 3.1. | Экранирование. Основные принципы конструирования экранов..... | 109 |
| 3.1.1. | Эффективность экранирования..... | 110 |
| 3.1.2. | Подавление паразитной емкостной связи..... | 110 |
| 3.1.3. | Защита от паразитных наводок..... | 111 |
| 3.1.4. | Металлизация..... | 112 |
| 3.1.5. | Подавление паразитной индуктивной связи..... | 112 |
| 3.1.6. | Экранирование постоянного и медленно изменяющегося магнитного поля..... | 113 |
| 3.1.7. | Экранирование высокочастотного магнитного поля..... | 113 |
| 3.1.8. | Одновременное экранирование электрического и магнитного полей..... | 116 |
| 3.1.9. | Экранирование электромагнитного излучения..... | 117 |
| 4. | РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ..... | 122 |
| 4.1 | Основные материалы для экранов..... | 122 |
| 4.2. | Композиционные поглощающие материалы и покрытия..... | 125 |
| 4.2.1. | Композиционные поглощающие материалы и покрытия в технологии Stealth..... | 128 |
| 4.2.2. | Экранирующие композиционные материалы в технике СВЧ..... | 130 |
| 4.3. | Диэлектрические радиопоглощающие материалы..... | 135 |
| 4.4. | Магнитные радиопоглощающие материалы..... | 139 |
| 4.5. | Радиопоглощающие материалы на основе сегнетоэлектриков и сегнетомагнетиков..... | 144 |
| 4.6. | Металлические экраны..... | 145 |
| 4.6.1. | Однослойные экраны..... | 145 |
| 4.6.2. | Многослойные металлические экраны..... | 146 |
| 4.7. | Сетчатые экраны..... | 149 |
| 4.8. | Комбинированные радиопоглощающие материалы..... | 152 |

| | |
|---|-----|
| 5. МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКРАНОВ..... | 169 |
| 5.1. Особенности измерений и анализа цепей в миллиметровом диапазоне длин волн..... | 169 |
| 5.2. Инструментальный анализ СВЧ цепей в миллиметровом диапазоне волн..... | 171 |
| 5.2.1. Измеряемые “цепные ” параметры СВЧ устройств..... | 171 |
| 5.2.2. Измерительные задачи анализа СВЧ цепей..... | 173 |
| 5.3. Измерение характеристик на фиксированной частоте..... | 176 |
| 5.3.1. Измерение коэффициента отражения..... | 176 |
| 5.3.2. Измерение коэффициента стоячей волны (модуля коэффициента отражения)..... | 177 |
| 5.3.3. Измерение фазы коэффициента отражения..... | 178 |
| 5.3.4. Измерение модуля коэффициента передачи..... | 178 |
| 5.3.5. Измерение фазы коэффициента передачи..... | 180 |
| 5.4. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Классификация и принципы построения..... | 181 |
| 5.4.1. Некоторые общие требования к измерителям параметров цепей миллиметрового диапазона волн..... | 181 |
| 5.4.2. Типы и классификация векторных анализаторов цепей..... | 182 |
| 5.4.3. Гетеродинные векторные анализаторы цепей..... | 186 |
| 5.4.4. Гомодинные векторные анализаторы цепей. Методы измерений в зависимости от модуляции опорного и измерительного сигналов..... | 188 |
| 5.4.5. Схемы с линейной фазовой модуляцией и фазовой манипуляцией измерительного сигнала..... | 193 |
| 5.4.6. Схема с модуляцией опорного сигнала | 195 |
| 5.4.7. Гомодинные схемы с одновременной модуляцией измерительного и опорного сигналов..... | 197 |
| 5.5. Гомодинные анализаторы для исследования цепей СВЧ | 202 |
| 5.5.1. Технические и эксплуатационные возможности АЦ..... | 206 |
| 5.5.2. Режим калибровки..... | 207 |
| 5.5.3. Режим количественного измерения параметров..... | 210 |
| 5.5.4. Режим настройки..... | 211 |
| 5.5.5. Режим измерения S-параметров устройств с преобразованием частоты..... | 212 |
| 5.5.6. Режим воспроизведения характеристик S-параметров электрически управляемых устройств..... | 213 |
| 5.6. Измерение скалярных частотных характеристик двух- и четырехполюсников | 214 |
| 5.6.1. Источники погрешностей..... | 216 |
| 5.7. Измерение векторных частотных характеристик двух- и четырехполюсников..... | 219 |
| 5.7.1. Автоматический анализатор цепей на основе векторного вольтметра. Калибровка при измерениях характеристик двух- и четырехполюсников... .. | 219 |

| | |
|--|-----|
| 5.7.2. Измерение векторных характеристик на основе измерения мощности..... | 221 |
| 5.7.3. Калибровка векторных анализаторов цепей на основе измерения мощности..... | 223 |
| 5.7.4. Многополосники для векторных анализаторов цепей на основе измерения мощности..... | 224 |
| 5.7.5. Установки для измерения параметров двух- и четырехполосников на основе измерения мощности..... | 227 |
| 5.8. Панорамные измерители КСВН и ослабления (ПИКО) в миллиметровом диапазоне волн..... | 235 |
| 5.9. Измерение эффективности экранирования..... | 237 |
| 5.10. Методика проведения измерений параметров гибких электромагнитных экранов..... | 239 |
| 6. ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННО-ВЯЗАНЫХ ПОЛОТЕН (ТРИКОТАЖА) ДЛЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... | 243 |
| 6.1. Конструкции экранов..... | 243 |
| 6.1.1. Обоснование применения трикотажной технологии..... | 243 |
| 6.1.2. Характеристика переплетений трикотажа..... | 245 |
| 6.1.3. Геометрические параметры структуры трикотажа..... | 250 |
| 6.1.4. Способы формирования упорядоченного строения трикотажа..... | 253 |
| 6.1.5. Способы формирования геометрических неоднородностей на поверхности машинно-вязаного полотна..... | 254 |
| 6.1.5.1. Методы получения рельефных машинно-вязаных основ..... | 254 |
| 6.1.5.2. Рельефные машинно-вязаные основы на базе прессовых переплетений..... | 263 |
| 6.1.5.3. Рельефные машинно-вязаные основы на базе комбинированных переплетений..... | 265 |
| 6.2. Экранирующие свойства трикотажных полотен с металлическими нитями..... | 272 |
| 6.2.1. Особенности трикотажных полотен для электромагнитных экранов..... | 272 |
| 6.2.2. Экранирующие свойства трикотажных полотен со встроенным металлическим микропроводом..... | 274 |
| 6.3. Формирование электромагнитных экранов нанесением порошковых материалов на трикотажные полотна..... | 283 |
| 6.4. Влияние на эффективность экранирования жидких сред, зафиксированных в трикотажных полотнах..... | 286 |
| 6.5 Экранирующие свойства жестких конструкции экранов электромагнитного излучения с жидкостными наполнителями..... | 289 |
| 7. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ЭКРАНИРУЮЩИХ И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ..... | 292 |
| 7.1. Химическое модифицирование волокнистых материалов..... | 293 |

| | |
|--|------------|
| 7.1.1. Физико-химические свойства волокнистых материалов..... | 293 |
| 7.1.2. Характеристика методов модифицирования материалов..... | 298 |
| 7.1.3. Химическое модифицирование полиакрилонитрила..... | 300 |
| 7.1.4. Механические свойства модифицированных волокон..... | 305 |
| 7.1.5. Методика фосфорилирования целлюлозных волокон..... | 306 |
| 7.2. Химическое осаждение никеля, кобальта на волокна..... | 308 |
| 7.2.1. Характеристика осаждаемых материалов..... | 308 |
| 7.2.2. Формирование наночастиц металлов из водных растворов..... | 309 |
| 7.2.3. Методика синтеза никельсодержащих материалов..... | 313 |
| 7.2.4. Методика синтеза кобальтсодержащих материалов..... | 320 |
| 7.2.5. Совместное осаждение сплавов Ni-Co и Ni-Fe..... | 324 |
| 7.3. Электрические свойства волокнистых материалов..... | 326 |
| 7.3.1. Методика исследования электрических свойств..... | 326 |
| 7.3.2. Электрические свойства металлосодержащих волокнистых материалов..... | 327 |
| 7.4. Методика стабилизации электрических свойств металлосодержащих волокнистых материалов..... | 329 |
| 8. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБКИХ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... | 333 |
| 8.1. Экранирующие свойства полотен на основе синтезированных волокнистых материалов..... | 333 |
| 8.1.1. Особенности методики исследования радиопоглощающих характеристик полотен..... | 333 |
| 8.1.2. Экранирующие свойства никельсодержащих материалов..... | 334 |
| 8.1.3. Экранирующие свойства кобальтсодержащих материалов..... | 338 |
| 8.2. Технология создания многослойных конструкций экранов электромагнитного излучения из трикотажных полотен..... | 339 |
| 8.2.1. Сшивание..... | 340 |
| 8.2.2. Склеивание..... | 341 |
| 8.2.3. Технология фиксации порошковых наполнителей между трикотажными полотнами..... | 341 |
| 8.3. Технология создания гибких экранов электромагнитного излучения и их применение..... | 342 |
| 8.3.1. Применение трикотажных полотен для создания гибких экранов..... | 343 |
| 8.3.2. Трикотажная экранирующая одежда..... | 347 |
| 8.3.3. Возможные применения эластичных трикотажных экранов в конструкциях РЭС..... | 347 |
| 8.4. Технология формирования многослойных конструкций экранов электромагнитного излучения..... | 350 |
| 8.4.1. Свойства многослойных конструкций экранов электромагнитного излучения на основе машинно-вязаных полотен..... | 350 |
| 8.4.2. Имитационные гибкие материалы..... | 352 |

| | |
|---|-----|
| 9. ПРИМЕНЕНИЕ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ..... | 355 |
| 9.1. Экранирование отдельных узлов РЭА и их соединений..... | 355 |
| 9.1.1. Экранирование трансформаторов..... | 355 |
| 9.1.2. Экраны высокочастотных катушек и контуров..... | 356 |
| 9.1.3. Защита транзисторов и интегральных схем..... | 356 |
| 9.1.4. Соединение отдельных блоков..... | 357 |
| 9.1.5. Экранирование проводов и кабелей..... | 358 |
| 9.2. Использование радиопоглощающих материалов и покрытий в системах вооружения..... | 359 |
| 9.2.1. Электромагнитная маскировка наземных объектов..... | 359 |
| 9.2.2. Снижение радиолокационной заметности воздушных и надводных целей..... | 360 |
| Заключение..... | 363 |
| Литература..... | 364 |

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АФС – антенно-фидерная система
БС – базовая станция
ВАЦ – векторный анализатор цепей
ВТ – военная техника
ВЧ – высокие частоты
ГВЗ – групповое время запаздывания
ГОСТ – государственный отраслевой стандарт
ЗЧ – звуковая частота
КВ – короткие волны
ЛВС – локальная вычислительная сеть
ЛЭП – линия электропередач
МРТ – мобильный радиотелефон
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПДУ – предельно допустимый уровень
ПЗУ – постоянное запоминающее устройство
ПК – персональный компьютер
ППЭ – плотность потока энергии
ПРЦ – передающий радиоцентр
ПС – паразитная связь
ПУ – помехоустойчивость
ПЧ – промежуточная частота
ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина
РЛС – радиолокационная система
РПК – радиопоглощающая конструкция
РПМ – радиопоглощающий материал
РПП – радиопоглощающее покрытие
РТС – радиотехнические средства
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
РЭС – радиоэлектронные средства
СВЧ – сверхвысокие частоты
СИЗ – средства индивидуальной защиты
СНиП – санитарные нормы и правила
ССЗ – санитарно-защитная зона
СУР – система управляемого рассеяния
УВЧ – ультравысокие частоты
УКВ – ультракороткие волны

ЧМ – частотная модуляция

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ЭДС – электродвижущая сила

ЭЛТ – электронно-лучевая трубка

ЭМВ – электромагнитная волна

ЭМИ – электромагнитное излучение

ЭМС – электромагнитная совместимость

ЭМП – электромагнитное поле

ЭМЭ – электромагнитная энергия

ЭН – энергетическая нагрузка

ЭП – электрическое поле

ЭПР – эквивалентная поверхность рассеивания

ЭСП – электростатическое поле

ВВЕДЕНИЕ

В результате жизнедеятельности человечества уровень электромагнитного излучения возрастает на несколько порядков. На протяжении своей жизни человек находится под их, главным образом, негативным воздействием. При этом широкий диапазон частот от единиц Гц до тысяч ГГц такого излучения может влиять на состояние человеческого организма на молекулярном уровне и отражаться на следующих поколениях. В повседневной жизни высокочастотные электромагнитные поля возникают при коммутационных процессах в электрических сетях, устройствах и бытовых приборах. Они представляют серьезную угрозу не только непосредственно пользователям или операторам этих устройств, но и людям, случайно попавшим в опасную зону действия этих излучений. Однако исследований в этой области чрезвычайно мало и однозначных результатов пока не получено.

Побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН), возникающие в различных электронных системах обработки данных, являются потенциальным источником утечки информации по электромагнитному каналу. Так персональный компьютер представляет собой источник высокочастотного электромагнитного излучения. В результате, содержащаяся в компьютере и отображаемая на экране монитора, информация можно принимать на расстоянии в сотни метров. В настоящее время одними из путей нейтрализации такой утечки являются использование генераторов шума, либо полное экранирование помещения металлическими листами с надежным заземлением. Однако применение генераторов шума приводит к созданию дополнительной неблагоприятной электромагнитной обстановки в защищаемом помещении. Это негативно сказывается непосредственно на самочувствии, здоровье и трудоспособности персонала, находящегося в зоне облучения, и в ряде случаев может привести к сбоям в электронно-вычислительных системах, экранирование металлическими листами защищаемых помещений требует больших экономических затрат и сложного процесса монтажа.

Разработка новейших, так называемых "не летальных" систем вооружения, принцип действия которых основан на использовании сверхмощных импульсов направленной электромагнитной волны, является приоритетным военным курсом ведущих стран мира. Результатом является создание так называемого высокоэффективного оружия направленной энергии. В результате его воздействия поверхность тела человека за 2 секунды нагревается до 54°C и достигается эффект болевого шока. Создание электромагнитных бомб, следствием взрыва которых является возникновение мощного электромагнитного импульса, приводит к возможности быстрого уничтожения радиоэлектронных устройств и систем. Одним из самых опаснейших является "электромагнитный" терроризм, основой которого так же является использование в качестве поражающего фактора энергии электромагнитного импульса. Устройства, способные создавать такие импульсы, могут приводиться в действие дистанционно с помощью мобильных средств связи,

вызывая выход из строя различного электронного оборудования, например, систем контроля и управления атомной электростанцией.

В радиолокации, основанной на передаче и приеме электромагнитных волн, весьма важной задачей является электромагнитная маскировка объектов для снижения их радиолокационной "заметности" и снижение дальности обнаружения.

Вследствие описанных выше причин, одной из важнейших проблем современности, является экранирование электромагнитных полей. В монографии обобщены методы, и средства защиты от полей радиочастот, принципы экранирования, характеристики экранов. Значительное внимание уделено гибким радиопоглотителям. Приводятся методики измерения, характеристики экранов, примеры экранирования отдельных узлов РЭА и их соединений, применение радиопоглощающих материалов и покрытий в системах вооружения.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО

ИЗЛУЧЕНИЯ

1.1. Возбуждение электромагнитного излучения

Электромагнитное поле (ЭМП), частным случаем которого является электромагнитное излучение (ЭМИ), можно рассматривать как особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами. ЭМП представляет собой взаимосвязанные переменные электрическое и магнитное поля. Взаимная связь электрического и магнитного полей заключается в том, что всякое изменение одного из них приводит к появлению другого: переменное электрическое поле, возбуждаемое ускоренно движущимися зарядами (источником поля), возбуждает в смежных областях пространства переменное магнитное поле, которое, в свою очередь, возбуждает в прилегающих к нему областях пространства переменное электрическое поле, и т.д. Таким образом, ЭМП распространяется от точки к точке пространства в виде электромагнитных волн (излучений), "бегущих" от источника. Благодаря конечной скорости распространения ЭМП оно может существовать автономно от сформировавшего его источника и не исчезает с устранением источника [1].

ЭМИ представляют собой переменное во времени ЭМП, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды. Максвеллом была разработана теория, позволяющая единым образом подходить к описанию ЭМИ всего частотного диапазона, начиная от радиоволн, и вплоть до гамма-излучения [2].

ЭМП характеризуется четырьмя векторными величинами: \vec{E} - напряженность электрического поля; \vec{D} - электрическая индукция; \vec{H} - напряженность магнитного поля; \vec{B} - магнитная индукция. Оно предстает как совокупность электрического (векторы \vec{E} , \vec{D}) и магнитного (векторы \vec{H} , \vec{B}) полей, находящихся во взаимной зависимости.

Электромагнитное поле полностью описывается системой уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}; \quad (1.1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (1.2)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \vec{\rho}; \quad (1.3)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (1.4)$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}; \quad (1.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}; \quad (1.6)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (1.7)$$

где \vec{j} - плотность тока проводимости;

$\bar{\rho}$ - объемная плотность заряда;

μ - относительная магнитная проницаемость среды;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная;

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\epsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная;

σ - удельная проводимость среды.

Следует отметить, что μ и ϵ являются комплексными величинами, зависящими от напряженности поля в среде. Электромагнитные волны характеризуются областью распространения, распределением напряженности поля в каждой точке пространства и изменением этих величин во времени. Такие же принципы могут быть положены в основу характеристики источников ЭМП.

Для возбуждения в пространстве совокупности изменяющихся электрического и магнитного полей необходимо существование изменяющегося во времени электрического тока или изменяющих свое положение в пространстве электрических или магнитных зарядов. Магнитное поле может возбуждаться как током проводимости, так и током смещения, т.е. изменением магнитной индукции (формулы (1.8, 1.9)) [3]:

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}; \quad (1.8)$$

$$I^{cm} = \frac{d}{dt} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{S}, \quad (1.9)$$

где S – площадь протекания токов;

I – ток проводимости;

I^{cm} – ток смещения.

Появление переменного магнитного поля приведет к появлению переменного электрического поля, и, следовательно, произойдет возбуждение электромагнитной волны (ЭМВ). Можно выделить несколько типов генераторных приборов, однако в большинстве из них возбуждение электромагнитного поля происходит от взаимодействия с потоком электронов: в вакууме (в электровакуумных приборах) или в материале (проводнике, полупроводниковых приборах).

1.2. Кооперативное действие электромагнитных полей

В реальности на живые организмы во многих случаях действуют несколько ЭМП разных частотных диапазонов [4]. Например, при работе с компьютером на оператора воздействуют ЭМП нескольких частотных диапазонов и типов, а именно, низкочастотное магнитное поле, низкочастотное электрическое поле, сумма высокочастотных полей, сумма высокочастотных электромагнитных полей (ВЭМП) светового диапазона, рентгеновское излучение [5]. Такое же сложное воздействие испытывает человек во время солнечных вспышек, когда на него воздействуют сумма ВЭМП, сумма ионизирующих лучей и добавляются на вторые сутки высокочастотные магнитные поля от геомагнитных возмущений [6].

Для выяснения причин кооперативного действия рассмотрим механизмы одинарно действующих ЭМП. Рассмотрение начнем с давно используемых в физиотерапии постоянных и низкочастотных электрических и магнитных полей [7].

Электрические постоянные и переменные низкочастотные поля.

В большинстве случаев при воздействии ЭМП на биологические структуры имеет место воздействие низковольтных электрических полей, кроме случайного, аварийного попадания биологических объектов в зону высоковольтных цепей. Воздействие низковольтных электрических полей проявляется в возникновении электрофоретических явлений. Постоянное электрическое поле вызывает перемещение неподвижных заряженных частиц, переориентацию, ускорение или торможение движущихся заряженных частиц в зависимости от полярности. Переменное электрическое поле увеличивает проницаемость этих частиц через мембраны за счет периодического изменения поляризации в зоне проникновения и ускоряет движение заряженных частиц в кровеносных сосудах, обладающих вентильными свойствами за счет имеющихся обратных клапанов [8].

Магнитные постоянные и переменные низкочастотные поля.

Воздействие магнитных полей изучено значительно меньше воздействия электрических полей, однако использование их в физиотерапии в последнее время позволяет говорить о воздействии на биологические структуры. Предложено несколько моделей действия магнитных полей. Наиболее вероятной моделью можно считать ориентационные последствия. В этом случае микрочастицы, имеющие магнитные свойства за счет ферритных включений или магнитного момента, изменяют свое положение в пространстве. Изменение ориентации будет наблюдаться у молекул с наименьшими размерами, как наиболее подвижными и находящимися в свободном состоянии в жидкости с малым коэффициентом вязкости.

Высокочастотные электромагнитные поля.

При воздействии ВЭМП на биологическую ткань происходят возбуждение, ионизация и диссоциация некоторых молекул ткани, вызывая появление новых электрически заряженных микрочастиц.

В случае одновременных действий ЭМП вышеупомянутых групп происходит не простое суммирование их действий, а совместное, кооперативное воздействие на биологические ткани, причем действия взаимно усиливают одно другое. Свободные микро- и макрочастицы, хаотически расположенные в жидких средах, ориентируются в направлении действия электрических и магнитных полей. В случае совпадения направления постоянных и низкочастотных ЭМП с направлением вектора ВЭМП увеличивается количество энергии, поглощенной электронами и, следовательно, количество трансформируемых микрочастиц. Этот эффект давно используется в лазерной физиотерапии и его действие обнаружено при исследовании лечебного эффекта физиотерапевтических генераторов миллиметрового диапазона волн.

Таким образом, резко увеличивается степень взаимодействия ВЭМП с биологическими структурами, либо увеличивается лечебный эффект, либо усиливается вредный эффект.

1.3. Источники электромагнитного излучения

Источники ЭМИ (рис. 1.1) можно характеризовать по нескольким критериям, из которых наиболее часто используемым является классификация по частотному диапазону. Основное деление всего известного диапазона излучений: радиоволны, инфракрасное излучение, видимый спектр, ультрафиолетовое, рентгеновское, гамма-излучение испытывает дополнительное дробление, определяемое условиями распространения радиоволн. Вошедшее в практику подразделение радиоволн на диапазоны приведено в табл. 1.1.

Источники радиоволн могут работать в пределах одного частотного диапазона или перестраиваться в некоторой полосе частот. С помощью электромагнитных волн можно передавать информацию в виде радиосигналов, отличающихся несущей частотой, шириной частотного спектра, видом модуляции. Таким образом, источник ЭМИ с точки зрения частотного деления характеризуется основной рабочей частотой (несущей частотой радиосигнала), шириной и видом спектральной характеристики излучаемого сигнала. Вид и ширина спектра ЭМИ зависят от мгновенного значения напряженности поля и характера изменения ее во времени. Гармонические колебания, наиболее широко применяемые в современной радиотехнике и удобные для анализа, характеризуются мгновенными значениями амплитуды, частоты и фазы. Следовательно, информационным параметром может быть изменение амплитуды, частоты и фазы. На основании этого выделяют радиосигналы с амплитудной, частотной и фазовой модуляцией.



Рис. 1.1. Источники электромагнитного излучения

Таблица 1.1

Деление радиоволн на диапазоны

| Волны | Диапазон длин волн, м | Диапазон частот, Гц |
|-------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| Декаметровые | $10^8 - 10^7$ | 3-30 |
| Метровые | $10^7 - 10^6$ | 30-300 |
| Гектокилометровые | $10^6 - 10^5$ | $3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$ |
| Мириаметровые | $10^5 - 10^4$ | $3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ |
| Километровые | $10^4 - 10^3$ | $3 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$ |
| Гектометровые | $10^3 - 10^2$ | $3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^6$ |
| Декаметровые | $10^2 - 10$ | $3 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^7$ |
| Метровые | 10-1 | $3 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^8$ |
| Дециметровые | 1-0,1 | $3 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$ |
| Сантиметровые | $10^{-1} - 10^{-2}$ | $3 \cdot 10^9 - 3 \cdot 10^{10}$ |
| Миллиметровые | $10^{-2} - 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{10} - 3 \cdot 10^{11}$ |
| Децимиллиметровые | $10^{-3} - 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12}$ |
| Световые | менее 10^{-4} | свыше $3 \cdot 10^{12}$ |

Важной характеристикой ЭМВ является поляризация. Поляризация - нарушение симметрии в распределении ориентации векторов напряженности электрического и магнитного полей в электромагнитной волне относительно направления ее распространения. Выделяют источники неполяризованных, частично поляризованных и полностью поляризованных излучений, причем различают вертикальную, горизонтальную, эллиптическую (в частном случае круговую) поляризации.

С точки зрения распространения ЭМИ в пространстве можно выделить источники направленного и ненаправленного излучения. Формирование распределения поля в области пространства возможно с помощью антенной системы. Направленные свойства антенны характеризуются диаграммой направленности. Используя способность ЭМВ распространяться в определенном направлении, осуществляется пространственная селекция радиосигналов.

Источники излучений характеризуются мощностью ЭМИ. Излучаемая энергия определяет дальность распространения ЭМВ, особенности взаимодействия их с некоторыми средами и влияния на биологические организмы. Мощность генераторов ЭМИ занимает широкий диапазон – от долей микроватт до нескольких миллионов ватт, в зависимости от назначения источника. Мощностью в несколько мегаватт обладают промышленные генераторы, радиопередающие устройства систем дальней радиосвязи, телевидения и радиовещания, устройства передачи энергии и радиолокационные системы. Нежелательные излучения таких генераторов осложняют электромагнитную обстановку и вредно влияют на работу более маломощных и высокочувствительных устройств. Источники ЭМП, воздействующие на различные рецепторы, можно разделить на группы. Требования к излучающим устройствам можно рассмотреть с точки зрения защиты информации, электромагнитной совместимости и помехоустойчивости радиоэлектронных средств и влияния на биологические организмы.

1.3.1. Природные источники электромагнитного излучения

Природные источники ЭМИ делят на две группы. Первая - поле Земли: постоянное электрическое и постоянное магнитное поле. Вторая группа - радиоволны, генерируемые космическими источниками (Солнце, звезды и т.д.), атмосферные процессы - разряды молний и т.д. Естественное электрическое поле Земли создается избыточным отрицательным зарядом на поверхности; его напряженность обычно от 100 до 500 В/м. Грозовые облака могут увеличивать напряженность поля до десятков, а то и сотен кВ/м [9]. Вторая группа природных источников ЭМИ характеризуется широким диапазоном частот.

Во время солнечных вспышек и бурь на человеческий организм обрушивается комплексный поток ЭМП, резко отличающихся своими основными физическими характеристиками и временем действия. Многолетние исследования действия ЭМП на биологические структуры выявили разнообразные последствия этих воздействий, отличия которых можно объяснить не только различными энергетическими показателями, но и частотными характеристиками, определяющими механизмы действия каждой группы ЭМП [10].

Рассмотрим характерный сценарий воздействия ЭМП при солнечной вспышке или буре. При образовании мощного протуберанца на Солнце к Земле устремляются потоки ЭМП и высокоэнергетических частиц. Электромагнитные поля достигают поверхности Земли примерно через 8 минут. Высокоэнергетические частицы достигают Земли примерно через 2 суток и задерживаются магнитосферой

Земли, вызывая при этом возникновение магнитных бурь или геомагнитных возмущений. После успокоения Солнца и разрушений протуберанцев поток ЭМП резко ослабевает до шумовых значений, а геомагнитное возмущение продолжает сохраняться в течении нескольких дней. Таким образом, влияние солнечной вспышки или бури можно разделить на три фазы или этапа, резко отличающихся по характеру воздействия.

В течение первой фазы на человека действуют только ВЭМП, которые можно разделить на две группы по механизму взаимодействия без четкой границы между ними. Первая группа – сравнительно низкочастотные ВЭМП (300 МГц) и ниже. Они вызывают внутри организма появление электрических потенциалов, особенно при возникновении резонансных явлений в отдельных органах, где добротность может достигать 10^4 . Эти потенциалы вызывают появление электрофоретических явлений. Вторая группа – ВЭМП, начиная примерно с 300 МГц, проявляют свое влияние на атомарном и молекулярном уровнях. Воздействие этих полей, благодаря явлениям аккумуляции, вызывает возбуждение, принудительные ионизацию и диссоциацию биологических молекул, несмотря на малые значения мощности ЭМП.

Во время второй фазы к действию ВЭМП добавляется действие возмущенного геомагнитного поля Земли, что вызывает существенное усиление воздействия солнечной вспышки на организм человека благодаря кооперативному действию низкочастотных ЭМП и ВЭМП. Появление низкочастотного магнитного поля приводит, во-первых, к возникновению явлений, обусловленных воздействием магнитного поля на макроструктуры и органы, обладающие магнитными свойствами. Во-вторых, магнитное поле вызывает принудительную ориентацию свободно взвешенных в жидкости молекул. Увеличение воздействия солнечной вспышки в этой фазе настолько возрастает, что некоторые исследования отмечают максимум смертей и сердечно-сосудистых кризисов в первый день геомагнитных возмущений.

Третья фаза характеризуется прекращением действия всех ВЭМП и действием только низкочастотного магнитного поля. Магнитное поле продолжает действовать на макроструктуры человеческого организма и, в зависимости от толерантности организма, либо подчеркивает, либо ослабляет последствия воздействия.

Многочасовое или даже многодневное воздействие комплекса ЭМП вызывает появление продуктов “последствия”, которые вызывают различные нарушения функционирования отдельных органов и организма в целом.

1.3.2. Антропогенные источники электромагнитного излучения

1.3.2.1. Электропроводка

Наибольший вклад в электромагнитную обстановку жилых помещений в диапазоне промышленной частоты 50 Гц вносит электротехническое оборудование

здания, а именно кабельные линии, подводящие электричество ко всем квартирам и другим потребителям системы жизнеобеспечения здания, а также распределительные щиты и трансформаторы [11]. В помещениях, смежных с этими источниками, обычно повышен уровень магнитного поля промышленной частоты, вызываемый протекающим электротоком. Уровень электрического поля промышленной частоты при этом обычно не высокий и не превышает ПДУ для населения 500 В/м. Примеры распределения магнитного поля промышленной частоты в помещениях приведены на рис. 1.2-1.4 [12].

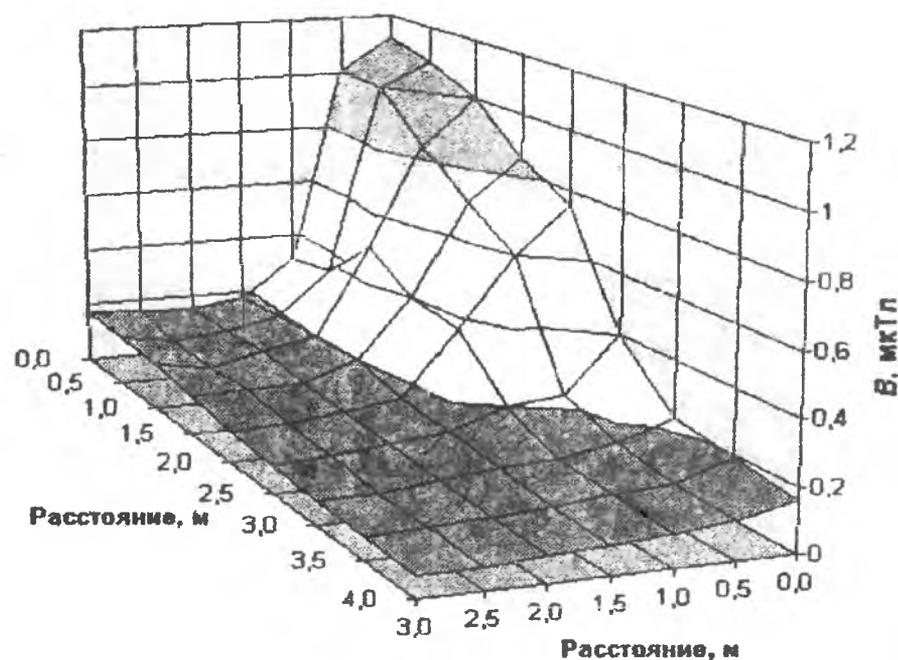


Рис. 1.2. Распределение магнитного поля промышленной частоты в жилом помещении. Источник поля - распределительный пункт электропитания, находящийся в смежном нежилом помещении

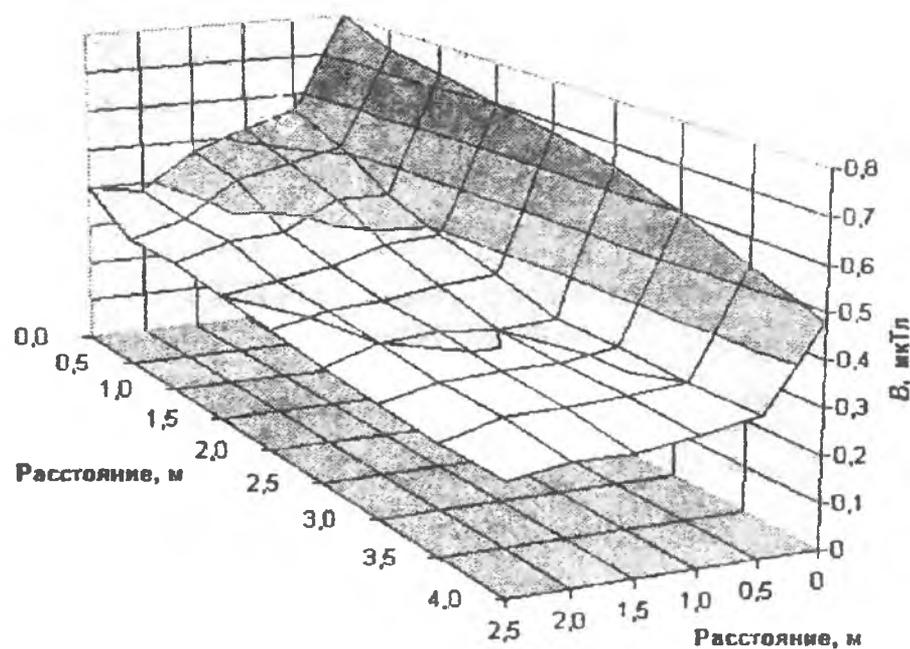


Рис. 1.3. Распределение магнитного поля промышленной частоты в жилом помещении. Источник поля - кабельная линия, проходящая в подъезде по внешней стене комнаты

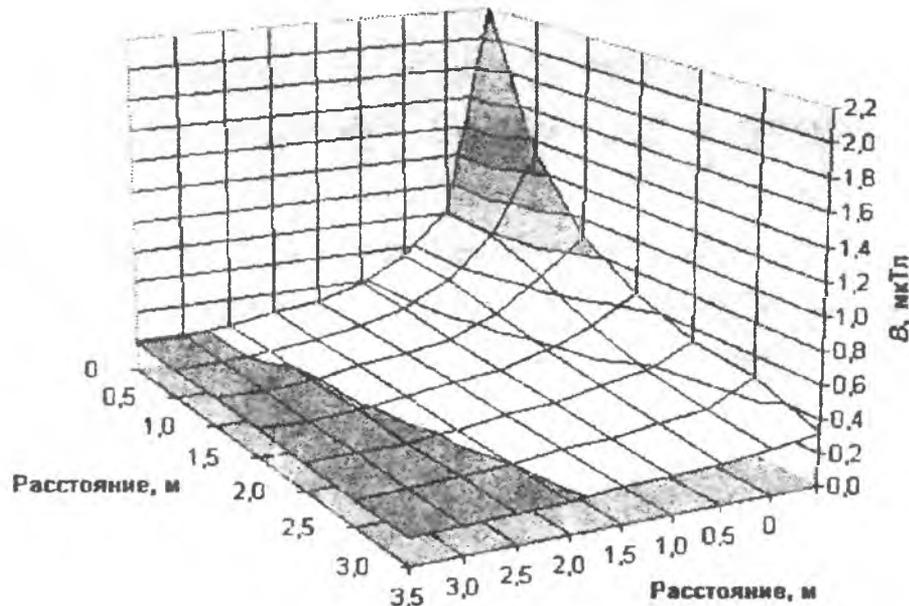


Рис. 1.4. Распределение магнитного поля промышленной частоты в жилом помещении. Источник поля - общий силовой кабель подъезда

В настоящее время результаты выполненных исследований не могут четко обосновать предельные величины или другие обязательные ограничения для продолжительного облучения населения низкочастотными магнитными полями малых уровней [13, 14].

Исследователи из университета Карнеги в Питсбурге (США) сформулировали подход к проблеме магнитного поля, который они назвали “благоразумное предотвращение”. Они считают, что пока наше знание относительно связи между здоровьем и последствием облучения остаются неполными, но существуют сильные подозрения относительно последствий для здоровья, необходимо предпринимать шаги по обеспечению безопасности, которые не несут тяжелые расходы или другие неудобства.

Подобный подход был использован, например, в начальной стадии работ по проблеме биологического действия ионизирующего излучения: подозрение рисков ущерба для здоровья, основанное на твердых научных основаниях, должно само по себе составить достаточные основания для выполнения защитных мероприятий.

В настоящее время многие специалисты считают предельно допустимой величину магнитной индукции равной 0,2-0,3 мкТл. При считается, что развитие заболеваний прежде всего лейкемии очень вероятно при продолжительном облучении человека полями более высоких уровней (несколько часов в день, особенно в ночные часы, в течении периода более года) [15].

1.3.2.2. Линии электропередач

На сегодняшний день можно считать установленным фактом, что воздействие электромагнитных полей высоковольтных линий электропередачи и других систем распределения электроэнергии значительно повышает вероятность лейкоза, рака головного мозга и других грозных заболеваний. Особенно подвержены воздействию электромагнитных полей дети [16].

Провода работающей линии электропередачи создают в прилегающем пространстве электрическое и магнитное поля промышленной частоты. Расстояние, на которое распространяются эти поля от проводов линии достигает десятков метров [17].

Дальность распространение электрического поля зависит от класса напряжения ЛЭП (цифра, обозначающая класс напряжения стоит в названии ЛЭП - например ЛЭП 220 кВ), чем выше напряжение - тем больше зона повышенного уровня электрического поля, при этом размеры зоны не изменяются в течении времени работы ЛЭП.

Дальность распространения магнитного поля зависит от величины протекающего тока или от нагрузки линии. Поскольку нагрузка ЛЭП может неоднократно изменяться как в течение суток, так и с изменением сезонов года, размеры зоны повышенного уровня магнитного поля также меняются.

Электрические и магнитные поля являются очень сильными факторами влияния на состояние всех биологических объектов, попадающих в зону их воздействия (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Допустимые уровни воздействия электрического поля ЛЭП на население

| ПДУ, кВ/м | Условия облучения |
|-----------|---|
| 0,5 | внутри жилых зданий. |
| 1,0 | на территории зоны жилой застройки. |
| 5,0 | в населенной местности вне зоны жилой застройки; (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов в пределах черты этих пунктов), а также на территории огородов и садов. |
| 10,0 | на участках пересечения воздушных линий электропередачи с автомобильными дорогами I – IV категорий. |
| 15,0 | в ненаселенной местности (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья). |
| 20,0 | в труднодоступной местности (недоступной для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения. |

Например, в районе действия электрического поля ЛЭП у насекомых проявляются изменения в поведении: так у пчел фиксируется повышенная агрессивность, беспокойство, снижение работоспособности и продуктивности, склонность к потере маток; у жуков, комаров, бабочек и других летающих насекомых наблюдается изменение поведенческих реакций, в том числе изменение направления движения в сторону с меньшим уровнем поля [18, 19, 20].

У растений распространены аномалии развития - часто меняются формы и размеры цветков, листьев, стеблей, появляются лишние лепестки [21, 22].

Здоровый человек страдает от относительно длительного пребывания в поле ЛЭП. Кратковременное облучение (минуты) способно привести к негативной реакцией только у гиперчувствительных людей или у больных некоторыми видами аллергии.

При продолжительном пребывании (месяцы - годы) людей в электромагнитном поле ЛЭП могут развиваться заболевания преимущественно сердечно-сосудистой и нервной систем организма человека. В последние годы в числе отдаленных последствий часто называются онкологические заболевания.

То, что длительное воздействие интенсивных электромагнитных полей промышленной частоты может вызвать повышенную утомляемость, появление сердечных болей, нарушение функций центральной нервной и эндокринной систем было известно еще с предвоенных времен. Однако лишь в 60-х годах, в ходе промышленного бума, когда линии электропередачи, контактная сеть железных дорог и метрополитена буквально опутали целые районы, стали появляться все более тревожные сведения.

В одной из первых работ была установлена связь между развитием лейкоза у детей в штате Колорадо (США) и воздействием электромагнитного излучения сетей промышленной частоты. Вслед за этим появилась информация об аналогичных исследованиях, проведенных в Швеции с 1958 по 1973 год для населения в возрасте 18 лет. Измерения электромагнитных излучений проводились для построек, расположенных в пределах 150 метров от подстанций, трансформаторов, электрических линий железных дорог и ЛЭП. Вокруг 48 жилых домов индукция магнитного поля составляла более 0,3 мкТл, и именно в этой группе жителей опухоли и лейкозы встречались в два раза чаще. Для сравнения отметим, что индукция магнитного поля ЛЭП 200 кВ составляла около 0,2 мкТл.

Позднее с целью проверки гипотезы о возможности развития опухолей у людей, проживающих вблизи воздушных линий электропередачи, в Швеции была проведена большая эпидемиологическая работа, которая закончилась в 1992 году. Под наблюдением находилось более 500 тысяч человек, проживающих от одного года до 25 лет в 800-метровых коридорах вдоль трасс ЛЭП 200 кВ и 400 кВ. Тщательная статистическая обработка данных показала, что существует корреляция между развитием рака, в особенности детской лейкемии, и воздействием поля ЛЭП. При повышении индукции поля выше 0,1 мкТл риск заболевания возрастает почти в 4 раза [23].

В Дании было обследовано 1707 детей до 16 лет, проживающих вблизи ЛЭП, у которых развились опухоли мозга, злокачественная лимфома и лейкемия.

Устойчивая корреляция между развитием опухоли у детей и их проживанием вблизи ЛЭП была установлена при средних значениях магнитного поля 0,3-0,4 мкТл и выше. Менее выраженная связь наблюдается и при значениях индукции от 0,1 мкТл.

В Финляндии была обследована группа из 134000 детей в возрасте до 19 лет, проживающих на расстоянии 500 метров от воздушных линий электропередачи

напряжением 110-400 кВ. Статистически значимая "избыточность" числа опухолей мозга была отмечена у мальчиков, которые подвергались воздействию магнитного поля с индукцией выше 0,2 мкТл. Ученые из университета штата Северная Каролина (США) обследовали большое число пациенток, имеющих контакт с электромагнитным излучением, и пришли к выводу, что воздействие поле увеличивает риск развития рака молочной железы. В США в 1991 году были опубликованы данные о повышенном риске заболевания лейкозом для детей, которые регулярно пользуются видеоиграми, электрическими одеялами или другими видами электрообогревателей.

Таблица 1.3

Границы санитарно-защитных зон ЛЭП

| Напряжение, кВ | <20 | 35 | 110 | 150-220 | 330-500 | 750 | 1150 |
|----------------|-----|----|-----|---------|---------|-----|------|
| Нормы, м | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 55 |

В некоторых странах с высокой плотностью населения под ЛЭП расположены жилые дома. У нас - пока только дачные участки [24]. Принято считать, что основное воздействие ЛЭП обусловлено электрическим полем переменного тока, индуцирующим в теле человека ток смещения (емкостной ток). Отечественный стандарт допускает постоянное пребывание людей в поле напряженности меньше 0,5 кВ/м. При напряженности поля в два-четыре раза выше (1-2 кВ/м) и частоте 50 Гц ток смещения не превышает 1,5-3 десятка микроампер и у человека не будет возникать никаких неприятных ощущений. Но стоит прикоснуться, например, к автомобилю, который стоит рядом с ЛЭП, и вас слегка "дернет". Металлическая крыша дома экранирует от переменного электрического поля только в том случае, если она заземлена (табл. 1.3).

Напряжение на проводах высоковольтных воздушных ЛЭП близко к порогу коронного разряда в воздухе. При ненастной погоде возникающий коронный разряд сбрасывает в атмосферу облака ионов разного знака, заряды которых не компенсируют друг друга. Даже вдали от ЛЭП электрическое поле, создаваемое ионным облаком на земной поверхности, может превышать не только естественное электрическое поле Земли, но и предельно допустимые уровни [25].

1.3.2.3. Бытовые приборы

Источником электромагнитного поля в жилых помещениях является разнообразная электротехника - холодильники, утюги, пылесосы, электропечи, телевизоры, и т.д. На электромагнитную обстановку квартиры влияют электротехническое оборудование здания, трансформаторы, кабельные линии. Электрическое поле в жилых домах находится в пределах 1-10 В/м. Однако могут встретиться точки повышенного уровня, например, незаземленный монитор компьютера [26].

Замеры напряженности магнитных полей от бытовых электроприборов показали, что их кратковременное воздействие может оказаться даже более сильным, чем долговременное пребывание человека рядом с линией электропередачи. Если отечественные нормы допустимых значений напряженности магнитного поля для населения от воздействия линии электропередачи составляют 1000 мГс, то бытовые электроприборы существенно превосходят эту величину.

Индукция магнитного поля от электроплит типа "Электра" на расстоянии 20-30 см от передней панели - там, где стоит хозяйка, - составляет 1-3 мкТл. У конфорок, оно, естественно, больше. А на расстоянии 50 см уже неотличимо от общего поля в кухне, которое составляет около 0,1-0,15 мкТл.

Невелики и магнитные поля от холодильников и морозильников. Так, по данным Центра электромагнитной безопасности (Россия), у обычного бытового холодильника поле выше предельно допустимого уровня (0,2 мкТл) возникает в радиусе 10 см от компрессора и только во время его работы. Однако у холодильников, оснащенных системой "no frost", превышение предельно допустимого уровня можно зафиксировать на расстоянии метра от дверцы.

Микроволновая печь (или СВЧ-печь) в своей работе использует для разогрева пищи электромагнитное поле, называемое также микроволновым излучением или СВЧ-излучением. Рабочая частота микроволновых печей составляет 2,45 ГГц. По различным причинам часть электромагнитного поля, предназначенного для разогрева пищи, проникает наружу, особенно интенсивно, как правило, в районе правого нижнего угла дверцы.

В России действуют санитарные нормы безопасности для СВЧ-печей (СН № 2606-83). Согласно этим санитарным нормам, величина мощности потока энергии электромагнитного поля не должна превышать 10 мкВт/см² на расстоянии 50 см от любой точки корпуса печи при нагреве 1 л воды.

Кроме СВЧ-излучения работу микроволновой печи сопровождает интенсивное магнитное поле, создаваемое током промышленной частоты 50 Гц. Для населения уровень магнитного поля промышленной частоты в нашей стране до сих пор не ограничен, несмотря на его существенное воздействие на организм человека при продолжительном облучении. В бытовых условиях однократное кратковременное включение (на несколько минут) не окажет существенного влияния на здоровье человека. Однако сейчас бытовая микроволновая печь часто используется для разогрева пищи в кафе и других производственных условиях, при этом работающий с ней человек попадает в ситуацию хронического облучения магнитным полем промышленной частоты. В таком случае на рабочем месте необходим обязательный контроль магнитного поля промышленной частоты и СВЧ-излучения.

Неожиданно малыми оказались поля от мощных электрических чайников. Так, на расстоянии 20 см от чайника "Tefal" поле составляет около 0,6 мкТл, а на расстоянии 50 см неотличимо от общего электромагнитного поля в кухне.

У большинства утюгов поле выше 0,2 мкТл обнаруживается на расстоянии 25 см от ручки и только в режиме нагрева.

Зато поля стиральных машин оказались достаточно большими. Например, у малогабаритной "Спини" поле на частоте 50 Гц у пульта управления составляет более 10 мкТл, на высоте 1 метра – 1 мкТл, сбоку на расстоянии 50 см-0,7 мкТл. В утешение можно заметить, что большая стирка - не столь частое занятие, да и при работе автоматической или полуавтоматической стиральной машины хозяйка может отойти в сторонку или просто выйти из ванной. Еще больше поле у пылесоса "Тайфун". Оно порядка 100 мкТл. Впрочем, здесь тоже есть утешительное обстоятельство: пылесос обычно таскают за шланг и находятся от него достаточно далеко. Рекорд держат электробритвы. Их поле измеряется сотнями мкТл. Таким образом, бреясь электробритвой, убивают сразу двух зайцев: приводят себя в порядок и попутно проводят магнитную обработку лица.

Западная промышленность уже реагирует на повышающийся спрос к бытовым приборам и персональным компьютерам, чье излучение не угрожает жизни и здоровью людей, рискнувших облегчить себе жизнь с их помощью. Так, в США многие фирмы выпускают безопасные приборы, начиная от утюгов с бифилярной катушкой и кончая неизлучающими компьютерами.

Реально создаваемое ЭМИ в зависимости от конкретной модели и режима работы может сильно различаться среди оборудования одного типа (рис. 1.5). Как было отмечено выше, при удалении от потенциального источника ЭМИ уровень поля убывает (рис. 1.6). Все ниже приведенные данные относятся к магнитному полю промышленной частоты 50 Гц.

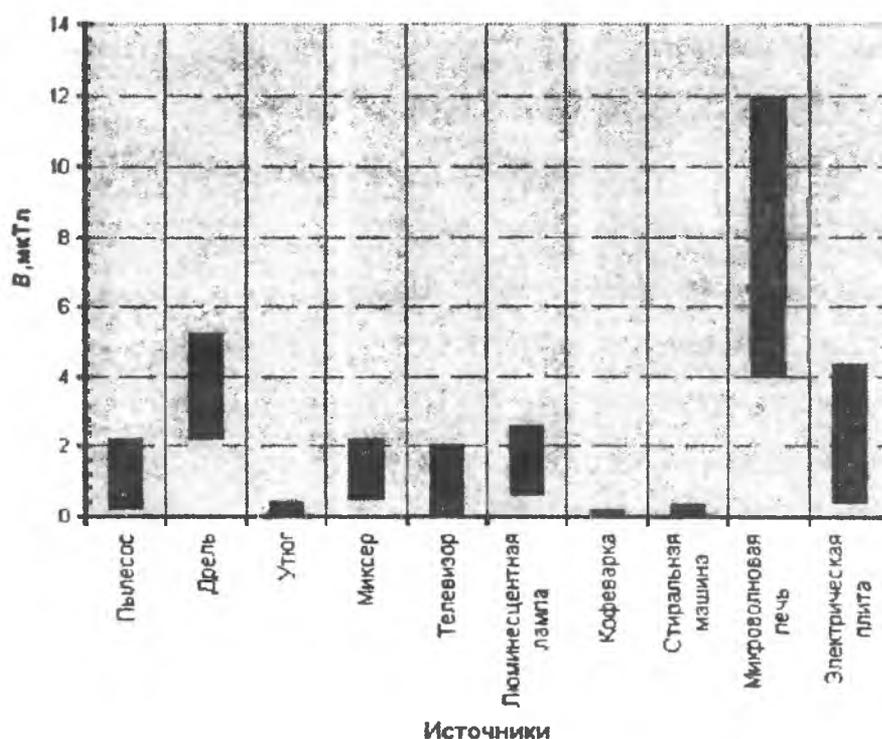


Рис. 1.5. Средние уровни магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов на расстоянии 0,3 м

Значения магнитного поля тесно связаны с мощностью прибора - чем она выше, тем выше магнитное поле при его работе. Значения электрического поля промышленной частоты практически всех электробытовых приборов не превышают нескольких десятков В/м на расстоянии 0,5 м, что значительно меньше ПДУ 500 В/м.

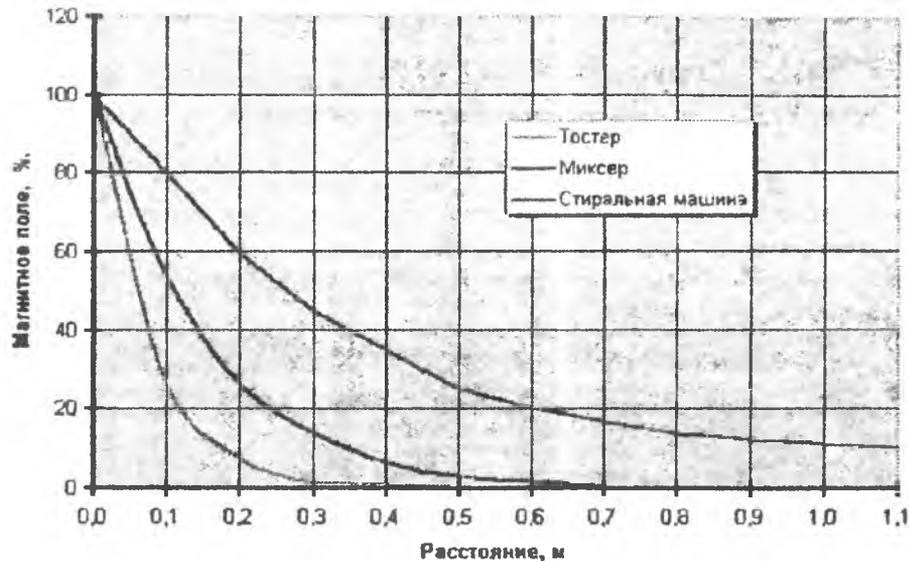


Рис. 1.6. Изменение уровня магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов в зависимости расстояния

В табл. 1.4 представлены данные о расстоянии, на котором фиксируется магнитное поле промышленной частоты (50 Гц) величиной 0,2 мкТл при работе ряда бытовых приборов.

Таблица 1.4

Распространение магнитного поля промышленной частоты от бытовых электрических приборов (выше уровня 0,2 мкТл)

| Источник | Расстояние, на котором фиксируется величина больше 0,2 мкТл |
|---|---|
| Холодильник, оснащенный системой «No frost» (во время работы компрессора) | 1,2 м от дверцы; 1,4 м от задней стенки |
| Холодильник обычный (во время работы компрессора) | 0,1 м от мотора |
| Утюг (режим нагрева) | 0,25 м от ручки |
| Телевизор 14" | 1,1 м от экрана; 1,2 м от боковой стенки. |
| Электрорадиатор | 0,3 м |
| Торшер с двумя лампами по 75 Вт | 0,03 м (от провода) |
| Электродуховка | 0,4 м от передней стенки |
| Аэрогриль | 1,4 м от боковой стенки |

Основным документом, устанавливающим требования к ПДУ ЭМП бытовых приборов являются “Межгосударственные санитарные нормы допустимых уровней физических факторов при применении товаров народного потребления в бытовых условиях”. Для отдельных видов товаров установлены свои нормы: “Предельно допустимые уровни плотности потока энергии, создаваемой микроволновыми печами”, “Предельно допустимые нормы напряженности электромагнитного поля, создаваемые индукционными бытовыми печами, работающих на частоте 20-22 кГц”, “ПДУ плотности потока энергии, создаваемой электромагнитными печами”. Значения ПДУ ЭМП для бытовой техники приведены в табл. 1.5.

Предельно допустимые уровни электромагнитного поля для потребительской продукции, являющейся источником ЭМП

| Источник | Диапазон | Значение ПДУ | Примечание |
|------------------------|--|---|--|
| Индукционные печи | 20-22 кГц | 500 В/м 4 А/м | Условия измерения: расстояние 0,3 м от корпуса |
| СВЧ печи | 2,45 ГГц | 10 мкВт/см ² | Условия измерения: расстояние 0,50 м от любой точки, при нагрузке 1 литр воды |
| Персональный компьютер | 5 Гц-2 кГц | $E_{пду} = 25 \text{ В/м}$ $B_{пду} = 250 \text{ нТл}$ | Условия измерения: расстояние 0,5 м вокруг монитора ПЭВМ |
| | 2-400 кГц | $E_{пду} = 2,5 \text{ В/м}$ $B_{пду} = 25 \text{ нТл}$ | |
| | Поверхностный электростатический потенциал | $V = 500 \text{ В}$ | Условия измерения: расстояние 0,1 м от экрана монитора ПЭВМ |
| Прочая продукция | 50 Гц | $E = 500 \text{ В/м}$ | Условия измерения: расстояние 0,5 м от корпуса изделия |
| | 0,3-300 кГц | $E = 25 \text{ В/м}$ | |
| | 0,3-3 МГц | $E = 15 \text{ В/м}$ | |
| | 3-30 МГц | $E = 10 \text{ В/м}$ | |
| | 30-300 МГц | $E = 3 \text{ В/м}$ | |
| | 0,3-30 ГГц | ППЭ = 10 мкВт/см ² | |

1.3.2.4. Персональный компьютер

Работа средств вычислительной техники сопровождается электромагнитными излучениями, которые являются источниками опасного сигнала и способны образовать канал утечки информации. В виду широкого использования персональных компьютеров на рабочем месте и дома, рассмотрим этот источник ЭМИ более подробно.

Основными составляющими частями персонального компьютера (ПК) являются: системный блок и разнообразные устройства ввода/вывода информации: клавиатура, дисковые накопители, принтер, сканер, и т. п. Каждый персональный компьютер включает средство визуального отображения информации называемое по-разному - монитор, дисплей. Как правило, в его основе - устройство на базе электронно-лучевой трубки. Персональные компьютеры часто оснащают сетевыми фильтрами, источниками бесперебойного питания и другим вспомогательным

электрооборудованием. Все эти элементы при работе ПК формируют сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя (табл. 1.6) [27].

Таблица 1.6

ПК как источник ЭМП

| Источник | Диапазон частот (первая гармоника) |
|---|------------------------------------|
| Монитор. Сетевой трансформатор блока питания | 50 Гц |
| Статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания | 20-100 кГц |
| Блок кадровой развертки и синхронизации | 48-160 Гц |
| Блок строчной развертки и синхронизации | 15-110 кГц |
| Ускоряющее анодное напряжение монитора (только для мониторов с ЭЛТ) | 0 Гц (электростатика) |
| Системный блок | 50 Гц-1000 МГц |
| Устройства ввода/вывода информации | 0 Гц, 50 Гц |
| Источники бесперебойного питания | 50 Гц, 20-100 кГц |

Электромагнитное поле, создаваемое персональным компьютером, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц, электрическую (E) и магнитную (H) составляющие, причем взаимосвязь их достаточно сложна, поэтому оценка E и H производится отдельно. Пример спектральной характеристики ПК в диапазоне 10 Гц-400 кГц приведен на рис. 1.7 [28].

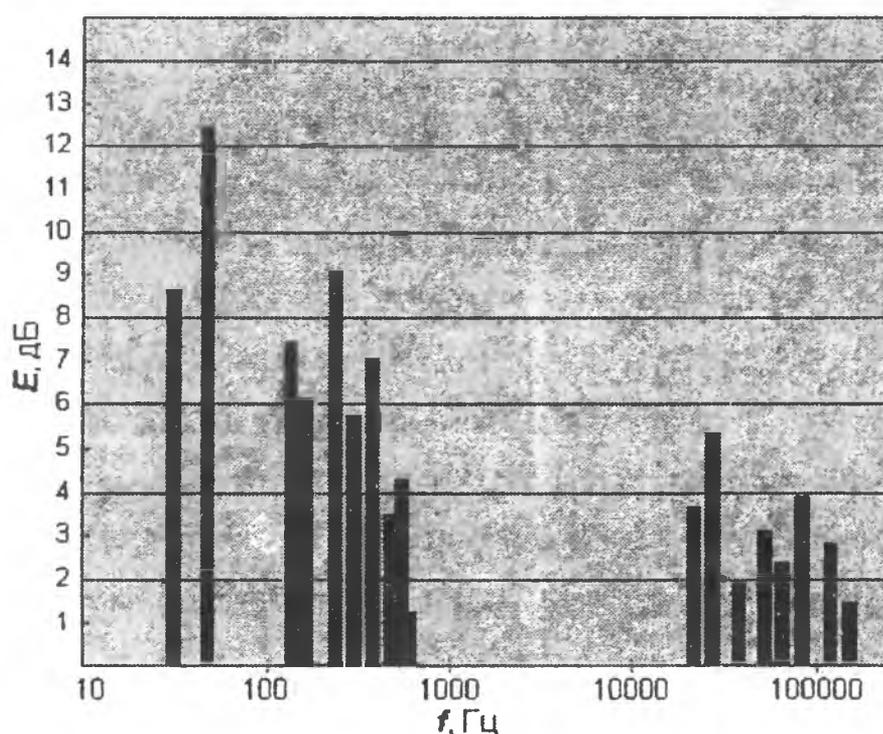


Рис. 1.7. Спектральная характеристика излучения монитора в диапазоне 10 Гц–400 кГц

Основным источником информационного сигнала, представляющего собой высокочастотное электромагнитное излучение, является дисплей. В подавляющем большинстве персональных компьютеров основным средством оперативного отображения информации является дисплей, созданный на базе электронно-лучевой трубки. Для формирования изображений, наблюдаемых на экране монитора, в составе ПК имеется специальная видеосистема. Ее основу составляют специализированные схемы для генерирования электрических сигналов, управляющих монитором. Эти схемы получили наименование видеоадаптеров (далее – просто адаптеры). Адаптер по существу – это буферное устройство между компьютером и монитором.

На плате адаптера установлены микросхемы ПЗУ знакогенератора, программируемого контроллера, видеопамяти (или видеобуфера) и другие. Схемы адаптера формируют сигналы, управляющие той информацией, которая выводится на экран монитора. Для этого во всех видеосистемах имеется видеобуфер. Он представляет собой область оперативной памяти, которая предназначена только для хранения текста или графической информации, выводимой на экран. Основная функция видеосистемы заключается в преобразовании данных из видеобуфера в те сигналы, которые управляют монитором и, в конце концов, формируют наблюдаемое на экране монитора изображение.

Следует отчетливо представлять, что любое текстовое или графическое изображение на экране состоит из огромного множества дискретных точек, называемых пикселями. Количество точек определяется конструкцией адаптера и в разных адаптерах различно, в зависимости от того, какое количество точек отводится на формирование знакоместа и собственно знака изображения.

Частота или скорость вывода пикселей в видеосистеме определяется аппаратно. Она называется частотой точек. Генератор, формирующий сигнал с этой частотой, называется задающим тактовым генератором.

Экспериментальные исследования показали, что излучение дисплея имеет в своем составе широкополосную и узкополосную составляющие. Уровень широкополосного излучения дисплея зависит от числа букв на экране, уровень узкополосной составляющей определяется системой синхронизации и частотой повторения светящихся точек – частотой следования импульсов.

Безопасность человека при работе с ПЭВМ зависит от двух групп параметров: эргономических и эмиссионных. Эмиссионные параметры – это уровни электростатического и электромагнитного, рентгеновского и ультрафиолетового излучений. Образующийся на экранах электростатический потенциал и вызванная им концентрация положительных ионов и заряженных частичек пыли и табачного дыма в зоне между пользователем и дисплеем приводят при продолжительной работе к нарушениям физиологических процессов и заболеваниям. Вокруг действующих дисплеев и персональных компьютеров (ПК) возникают низкочастотные, а в последнее время и все, более высокочастотные электромагнитные поля [29].

Частичную защиту от излучений в направлении пользователя могут обеспечить качественные фильтры. Однако следует отметить, что установка фильтров на экранах электронно-лучевых трубок (ЭЛТ), уменьшая электрическую составляющую ЭМП в непосредственной близости от экрана, может вследствие перераспределения поля привести к увеличению поля на расстояниях более 1-1,5 м от экрана по оси ЭЛТ и изменить соотношение полей по сторонам от него.

Магнитная составляющая ЭМП при установке фильтра практически не изменяется. Для того чтобы ее подавить, в дисплее должны быть приняты специальные меры по компенсации полей отклоняющей системы, трансформаторов схем развертки и электропитания, что является достаточно дорогой и сложной процедурой [30].

По данным российских и зарубежных, в основном шведских, специалистов, низкочастотные излучения ПК могут быть опасными для здоровья при продолжительном облучении. К сожалению, сегодня не установлены конкретные количественные связи между уровнями, диапазонами частот излучений ПК и теми или иными заболеваниями. Можно лишь утверждать, что электростатические поля, неизменно существующие у дисплеев с ЭЛТ, безусловно, сказываются на здоровье человека из-за нарушения ионного состава воздуха.

В течении 1994 – 1996 годов сотрудниками Центра Электромагнитной безопасности России при участии сотрудников Лаборатории измерения параметров электромагнитной совместимости ВНИИФТРИ и Лаборатории электромагнитных волн НИИ медицины труда РАМН проводились измерения электромагнитного поля непосредственно на рабочих местах пользователей. Всего были проведены измерения на 474 рабочих местах оснащенных мониторами 72-х типов 1990-96 г.г. выпуска. Максимальные зафиксированные на рабочих местах пользователей ПК значения полей приведены в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Максимальные зафиксированные на рабочем месте значения ЭМП

| Вид поля, диапазон частот, единица измерения напряженности поля | Значение напряженности поля | |
|---|-----------------------------|-----------------|
| | по оси экрана | вокруг монитора |
| Электрическое поле, 100 кГц-300 МГц, В/м | 17,0 | 24,0 |
| Электрическое поле, 0,02-2 кГц, В/м | 150,0 | 155,0 |
| Электрическое поле, 2-400 кГц В/м | 14,0 | 16,0 |
| Магнитное поле, 0,02-2 кГц, мА/м | 550,0 | 600,0 |
| Магнитное поле, 2-400 кГц, мА/м | 35,0 | 35,0 |
| Электростатическое поле, кВ/м | 22,0 | - |

В 1998 году Северо-западным научным центром гигиены и общественного здоровья Министерства Здравоохранения выполнена работа по контролю соответствия уровней ЭМП на рабочем месте пользователя требованиям гигиенических норм РФ. Данные о зафиксированных значениях поля при обследовании более 120 рабочих мест пользователей ПК приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8

Диапазон значений электромагнитных полей, измеренных на рабочих местах пользователей ПК

| Наименование измеряемых параметров | Диапазон частот 5 Гц-2 кГц | Диапазон частот 5 Гц-2 кГц |
|--|----------------------------|----------------------------|
| Напряженность переменного электрического поля, (В/м) | 1,0-35,0 | 0,1-1,1 |
| Индукция переменного магнитного поля, (нТл) | 6,0-770,0 | 1,0-32,0 |

Шведский институт защиты от излучений, соразработчик спецификаций стандарта безопасности MPR II, в своем отчете приводит результаты измерений электромагнитного поля 150 моделей мониторов (см. табл. 1.9).

Таблица 1.9

Максимальные и средние величины электромагнитного излучения ПК по данным Шведского института защиты от излучений

| Расстояние | Среднее значение | | | Максимальное значение | | |
|--|------------------|------------|--------|-----------------------|------------|--------|
| | 0,5 м | | 0,3 м | 0,5 м | | 0,3 м |
| Направление излучения | по оси | вокруг | по оси | вокруг | по оси | по оси |
| Вид поля, диапазон частот, единица измерения | | | | | | |
| Магнитное поле, 5Гц-2 кГц, нТл | <200 | <200 | <200 | 260 | 500 | 730 |
| Электрическое поле, 5Гц-2 кГц, В/м | <10 | Нет данных | 17 | 74 | Нет данных | 152 |
| Электрическое поле, 2-400 кГц, В/м | 1,7 | 1,9 | 4,2 | 12 | 12 | 32 |
| Электростатический потенциал, В | 500 | 500 | 500 | 19900 | 19000 | 19000 |

Наличие в помещении нескольких компьютеров со вспомогательной аппаратурой и системой электропитания создает сложную картину ЭМИ. Рис. 1.8

иллюстрирует типичный пример распределение магнитного поля промышленной частоты в помещении компьютерного зала. Очевидно, что электромагнитная обстановка в помещениях с компьютерами крайне сложная, распределение полей неравномерное, а уровни достаточно высоки, чтобы говорить об опасности их биологического действия [31].

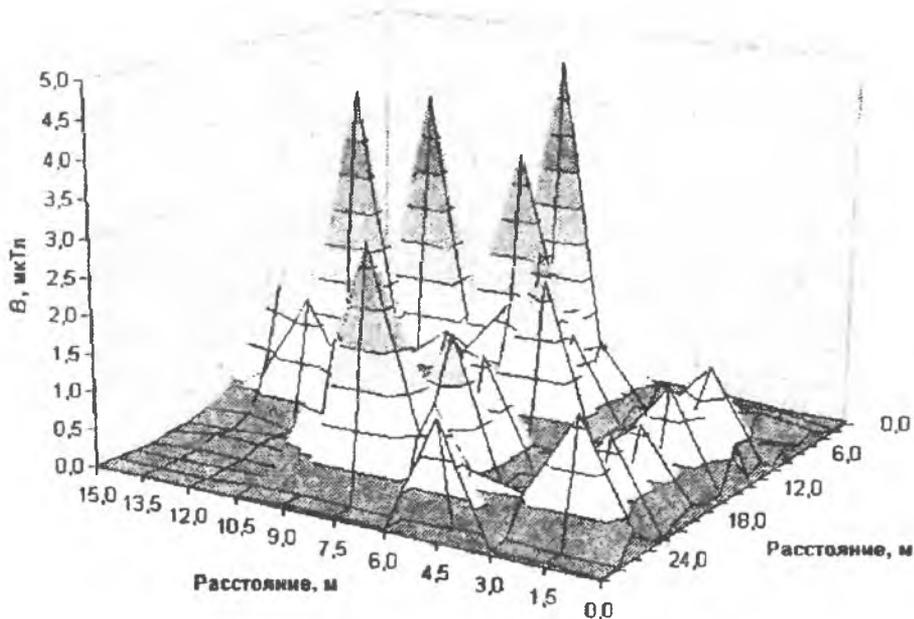


Рис. 1.8. Пример типичного распределения магнитного поля в диапазоне 5 Гц–2 кГц в помещении, оснащенном компьютерами

При работе монитора на экране кинескопа накапливается электростатический заряд, создающий электростатическое поле. В разных исследованиях, при разных условиях измерения значения ЭСП колебались от 8 до 75 кВ/м. При этом люди, работающие с монитором, приобретают электростатический потенциал. Разброс электростатических потенциалов пользователей колеблется в диапазоне от -3 до +5 кВ. Когда ЭСП субъективно ощущается, потенциал пользователя служит решающим фактором при возникновении неприятных субъективных ощущений [32, 33].

Заметный вклад в общее электростатическое поле вносят электризующиеся от трения поверхности клавиатуры и мыши. Эксперименты показывают, что даже после работы с клавиатурой, электростатическое поле быстро возрастает с 2 до 12 кВ/м. На отдельных рабочих местах в области рук регистрировались напряженности статических электрических полей более 20 кВ/м.

Впервые значительное комплексное исследование возможного неблагоприятного действия электромагнитных полей на здоровье пользователей было проведено в 1984 году в Канаде. Поводом для проведения работы послужили многочисленные жалобы сотрудниц бухгалтерии одного из госпиталей. Для выявления причинных факторов были измерены все виды излучений, был распространен вопросник, касающийся всех видов воздействия на здоровье. В отчете по итогам работы была установлена однозначная связь заболеваемости с одним из ведущих факторов внешнего воздействия - ЭМИ, генерируемым монитором компьютера.

По обобщенным данным, у работающих за монитором от 2 до 6 часов в сутки функциональные нарушения центральной нервной системы происходят в среднем в 4,6 раза чаще, чем в контрольных группах, болезни сердечно-сосудистой системы - в 2 раза чаще, болезни верхних дыхательных путей - в 1,9 раза чаще, болезни опорно-двигательного аппарата - в 3,1 раза чаще. С увеличением продолжительности работы на компьютере соотношения здоровых и больных среди пользователей резко возрастает.

По данным Бюро трудовой статистики США в период с 1982 по 1990 г. наблюдалось восьмикратное увеличение случаев расстройства здоровья (нетрудоспособности) пользователей ПК. Также, установлено, что частое воздействие электромагнитного излучения мониторов приводит к аномальным исходам беременности [34].

Исследования функционального состояния пользователя компьютера, проведенные в 1996 году Центром электромагнитной безопасности России, показали, что даже при кратковременной работе (45 минут) в организме пользователя под влиянием электромагнитного излучения монитора происходят значительные изменения гормонального состояния и специфические изменения биотоков мозга. Особенно ярко и устойчиво эти эффекты проявляются у женщин. Замечено, что у групп лиц (в данном случае это составило 20%) отрицательная реакция функционального состояния организма не проявляется при работе с ПК менее 1 часа. Исходя из анализа полученных результатов сделан вывод о возможности формирования специальных критериев профессионального отбора для персонала, использующего компьютер в процессе работы.

По мнению ряда исследователей, электростатическое поле ПК напряженностью 15 кВ/м при одночасовой экспозиции играющих на компьютере подростков усиливает возбуждательные процессы в центральной нервной системы и сдвигает вегетативный гомеостаз в сторону симпатического преобладания [35].

Исследования общих закономерностей реакции организма человека на воздействие ЭМИ монитора проводятся в Украине. Результаты свидетельствуют, что среди прочих нарушений в функциональном состоянии организма, наиболее ярко выражены нарушения со стороны гормональной и иммунной систем. Отклонение в иммунном статусе, в равной степени, как иммунодефицит, так и аутоиммунность, являются основополагающими в дискоординации процессов, которые поддерживают гомеостаз в организме в целом.

Обследование 1583 женщин, проведенное в Окленде (штат Калифорния, США) Кайзеровским медицинским центром, показало, что для женщин, более 20 часов в неделю пользующихся компьютерными терминалами, риск выкидыша на ранних и поздних стадиях беременности на 80% выше, чем для женщин, которые выполняют ту же работу без дисплейных терминалов. По данным ученых Швеции существует 90% вероятности, что у пользователей ПК в 1,5 раза чаще случаются выкидыши и у них рождается детей с врожденными пороками в 2,5 раза больше, чем у женщин других профессий.

Нью-Йорский комитет по охране труда и профилактике профессиональных заболеваний считает, что беременные или имеющие намерения забеременеть женщины должны переводиться на работу не связанную с использованием ПК.

Самой эффективной мерой борьбы с вредными излучениями является экранирование излучающих блоков [36, 37]. В результате после применения конструктивных решений предельно допустимые значения параметров электромагнитных излучений не должны превышать на расстоянии 50 см, соответственно:

| | | |
|--|------------|----------|
| по электрической составляющей | | 10 В/м, |
| по магнитной составляющей | | 0,3 А/м, |
| по электрической составляющей в диапазоне | 5 Гц-2 кГц | 25 В/м, |
| | 2-400 кГц | 2,5 В/м, |
| плотность магнитного потока в диапазоне | 5 Гц-2 кГц | 250 нТл, |
| | 2-400 кГц | 25 нТл, |
| поверхностный электростатический потенциал | | 500 В. |

Однако, неблагоприятное влияние электромагнитных полей на здоровье пользователя также проявляется и косвенно посредством других биологических эффектов ЭМИ [38], о которых следует рассказать подробнее.

Влияние на здоровье пользователя компьютера других неблагоприятных факторов на рабочем месте

Влияние аэроионного состава воздуха.

Зонами, воспринимающими аэроионы в организме человека, являются дыхательные пути и кожа. Единого мнения относительно механизма воздействия аэроионов на состояние здоровья человека нет.

Недостаток содержания легких аэроионов в помещениях с персональными компьютерами приводит к выраженному негативному эффекту. Субъективно недостаток легких аэроионов во вдыхаемом воздухе выражается в ощущении несвежести воздуха и нехватки кислорода. Наибольшее число жалоб, предъявляемых в условиях аэроионной недостаточности: неудовлетворительное самочувствие, повышенная утомляемость, частые головные боли, повышенное давление. Также негативно сказывается преобладание положительных аэроионов, которое может приводить к ухудшению самочувствия людей, бессоннице, утомлению, снижению работоспособности.

Влияние на зрение.

К зрительному утомлению пользователя ПК относят целый комплекс симптомов: появление "пелены" перед глазами, глаза устают, делаются болезненными, появляются головные боли, нарушается сон, изменяется психофизическое состояние организма. Необходимо отметить, что жалобы на зрение могут быть связаны как с упомянутыми выше факторами ПК, так и с условиями освещения, состоянием зрения оператора и др.

Среди лиц, работающих с ПК, были зарегистрированы случаи заболевания катарактой. Статистический анализ имеющихся данных показал, что частота возникновения катаракты при работе с дисплеями значимо не отличается от таковой у других лиц, не работающих с дисплеями.

Существуют противоречивые данные о развитии миопии (близорукость) у пользователей ПК. По данным Калифорнийского Университета (США) из 150 человек, работающих на дисплеях в среднем по шесть часов в день в течение 4 лет у 100 человек наблюдалась проблема с фокусировкой зрения [39]. В связи с этим важно систематическое исследование зрения лиц, работающих с компьютером, с целью его коррекции в случае необходимости.

Синдром длительной статической нагрузки (СДСН).

У пользователей дисплеев развивается мышечная слабость, изменения формы позвоночника. В США признано, что СДСН - профессиональное заболевание 1990-1991 годов с самой высокой скоростью распространения. При вынужденной рабочей позе, при статической мышечной нагрузке мышц ног, плеч, шеи и рук длительно пребывают в состоянии сокращения. Поскольку мышцы не расслабляются, в них ухудшается кровоснабжение; нарушается обмен веществ, накапливаются биопродукты распада и, в частности, молочная кислота. У 29 женщин с синдромом длительной статической нагрузки бралась биопсия мышечной ткани, в которых было обнаружено резкое отклонение биохимических показателей от нормы.

Стресс.

Пользователи ПК часто находятся в состоянии стресса. По данным Национального Института охраны труда и профилактики профзаболеваний США (1990 г.) пользователи ПК в большей степени, чем другие профессиональные группы, включая авиадиспетчеров, подвержены развитию стрессорных состояний. При этом у большинства пользователей работа на ПК сопровождается значительным умственным напряжением. Показано, что источниками стресса могут быть: вид деятельности, характерные особенности компьютера, используемое программное обеспечение, организация работы, социальные аспекты. Работа на ПК имеет специфические стрессорные факторы, такие как время задержки ответа (реакции) компьютера при выполнении команд человека, "обучаемость командам управления" (простота запоминания, похожесть, простота использования и т.н.), способ визуализации информации и т.д. Пребывание человека в состоянии стресса может привести к изменениям настроения человека, повышению агрессивности, депрессии, раздражительности. Зарегистрированы случаи психосоматических расстройств, нарушения функции желудочно-кишечного тракта, нарушение сна, изменение частоты пульса, менструального цикла. Пребывание человека в условиях длительно действующего стресс-фактора может привести к развитию сердечно-сосудистых заболеваний.

Дерматиты.

Экспериментально было доказано, что ЭСП способствует отложению аэрозольных частиц на лице и что в зависимости от природы аэрозольных загрязняющих частиц, у некоторых чувствительных лиц могут возникать те или иные кожные реакции. В научной литературе описаны случаи развития дерматита на лице у пользователей ПК. Дерматит исчезал, если пользователей отстранили от работы с ПК. Высказывается предположение, что экзема развивается из-за наличия электростатического поля.

Тендовагиниты.

Весьма распространенным у пользователей ПК является поражение сухожилий кистей рук, т.н. "запястный синдром", пользователи жалуются на боли в запястьях. В дальнейшем возможно развитие контрактур.

Обобщенные данные о субъективных жалобах пользователей и возможные причины их проявления приведены в табл. 1.10.

Предельно допустимые уровни, генерируемого монитором электромагнитного поля и поверхностного электростатического приведены в табл. 1.11.

В качестве технических стандартов безопасности дисплеев широко известны международный ISO 9241; шведские MPR II, TCO'91/92/95/99; немецкие Blue Angel, TUV; американский FCC Class B; российские ГОСТ Р 50948-96, ГОСТ Р 50949-96, СанПиН 2.2.2.542-96 [40]. Эти документы определяют требования к дисплею ПК по параметрам, способным оказывать влияние на здоровье пользователя.

Таблица 1.10

Субъективные жалобы пользователей персонального компьютера
возможные причины их происхождения

| Субъективные жалобы | Возможные причины |
|----------------------------|---|
| Резь в глазах | Визуальные эргономические параметры монитора, освещение на рабочем месте и в помещении |
| Головная боль | Аэроионный состав воздуха в рабочей зоне, режим работы |
| Повышенная нервозность | Электромагнитное поле, цветовая гамма помещения, режим работы |
| Повышенная утомляемость | Электромагнитное поле, режим работы |
| Расстройство памяти | Электромагнитное поле, режим работы |
| Нарушение сна | Режим работы, электромагнитное поле |
| Выпадение волос | Электростатические поля, режим работы |
| Прыщи и покраснение кожи | Электростатические поле, аэроионный и пылевой состав воздуха в рабочей зоне |
| Боли в животе | Неправильная посадка, вызванная неправильным устройством рабочего места |
| Боль в пояснице | Неправильная посадка пользователя, вызванная устройством рабочего места, режим работы |
| Боль в запястьях и пальцах | Неправильная конфигурация рабочего места, в том числе высота стола не соответствует росту и высоте кресла; неудобная клавиатура; режим работы |

ПДУ электромагнитного поля и поверхностного электростатического потенциала монитора компьютера

| Вид поля | Диапазон частот | Единица измерения | ПДУ |
|---|-----------------|-------------------|-----|
| Магнитное | 5Гц- 2кГц | нТл | 250 |
| Магнитное | 2- 400 кГц | нТл | 25 |
| Электрическое | 5Гц- 2кГц | В/м | 25 |
| Электрическое | 2- 400 кГц | В/м | 2,5 |
| Эквивалентный электростатический потенциал | (поверхностный) | В | 500 |

Наиболее жесткие требования к монитору предъявляет ТСО 95. Он ограничивает параметры излучения монитора, потребления электроэнергии, визуальные параметры, что делает монитор наиболее лояльным к здоровью пользователя. В части эмиссионных параметров ему соответствует и ТСО 92. Разработан стандарт Шведской конфедерацией профсоюзов.

Стандарт MPR II менее жесткий – устанавливает предельные уровни электромагнитного поля примерно в 2,5 раза выше. Разработан Институтом защиты от излучений (Швеция) и рядом организаций, в том числе крупнейших производителей мониторов.

В части электромагнитных полей стандарту MPR II соответствует российские санитарные нормы “Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ”.

Однако надо отметить, что после транспортировки излучающие параметры мониторов ПК могут не соответствовать требованиям, указанным в стандартах, имеющим к ним отношение (например, завышенный уровень ЭМИ). Мониторы, прошедшие тестирование на соответствие любому из шведских стандартов ТСО, не требуют применения дополнительных средств защиты (при условии соблюдения правил подключения к электрической сети) [41].

Для того, чтобы у монитора ПК работали защитные экранирующие свойства, при подключении его необходимо заземлить. Заземление не должно выполняться на рабочий “ноль” системы электропитания, батарею или водопроводную трубу.

Особенности работы с компьютером женщин

Женщины со времени установления беременности и в период кормления ребенка грудью к выполнению всех видов работ, связанных с использованием ПК, не допускаются. Трудоустройство беременных женщин следует осуществлять в соответствии с “Гигиеническими рекомендациями по рациональному трудоустройству беременных женщин” [42].

По мнению ряда специалистов, женщинам, имеющим намерение забеременеть также целесообразно отказаться от работы с компьютером, поскольку

эмбрион на ранних стадиях развития чрезвычайно чувствителен к электромагнитному полю.

Особенности работы с компьютером детей

Для работы детей, особенно в домашних условиях, необходимо приобретать мониторы, излучающие меньше всего – мониторы, прошедшие тестирование на соответствие любому из шведских стандартов ТСО [43].

Необходимо строго следить за продолжительностью работы детей с компьютером (табл. 1.12).

Таблица 1.12

Допустимое время работы детей за компьютером

| Дошкольники, возраст (лет) | Максимальное допустимое время работы, мин |
|----------------------------|---|
| 5 | 7 |
| 6 | 10 |
| Школьники, класс | Максимальное допустимое непрерывное время работы, мин |
| 1 (шестилетки) | 10 |
| 2-5 | 15 |
| 6-8 | 20 |
| 8-9 | 25 |
| 10-11 | 30 на первом часу занятий, 20 на втором часу |

1.3.2.5. Электротранспорт

Транспорт на электрической тяге – электропоезда (в том числе поезда метрополитена), троллейбусы, трамваи и т.п. – является относительно мощным источником магнитного поля в диапазоне частот от 0 до 1000 Гц [44, 45].

По данным (Stenzel et al., 1996), максимальные значения плотности потока магнитной индукции (В) в пригородных "электричках" достигают 75 мкТл при среднем значении 20 мкТл [46, 47]. Среднее значение (В) на транспорте с электроприводом постоянного тока зафиксировано на уровне 29 мкТл (рис. 1.9) [48, 49].

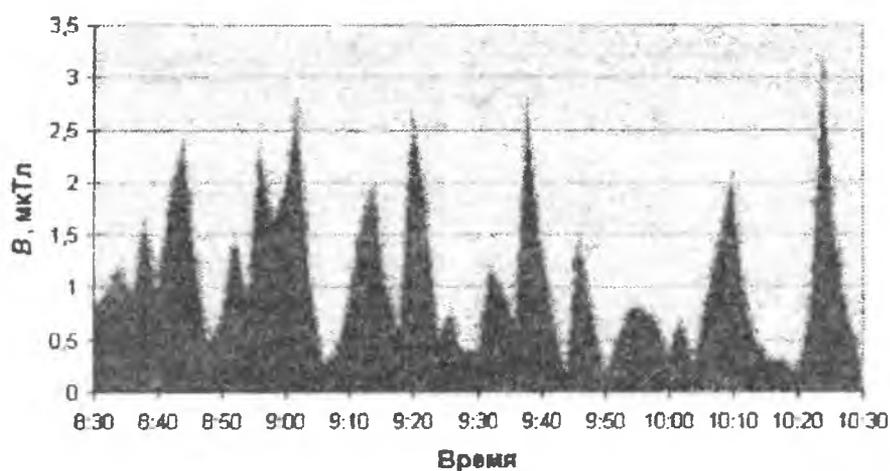


Рис. 1.9. Уровень потока магнитной индукции генерируемого железнодорожным транспортом на удалении 12 метров от железнодорожного полотна

Сотовая радиотелефония является сегодня одной из наиболее интенсивно развивающихся телекоммуникационных систем. В настоящее время во всем мире насчитывается несколько сотен миллионов абонентов, пользующихся услугами этого вида подвижной (мобильной) [50].

Основными элементами системы сотовой связи являются базовые станции и мобильные радиотелефоны. Базовые станции (БС) поддерживают радиосвязь с мобильными радиотелефонами (МРТ), вследствие чего БС и МРТ являются источниками ЭМИ в УВЧ диапазоне.

Важной особенностью системы сотовой радиосвязи является весьма эффективное использование выделяемого для работы системы радиочастотного спектра (многократное использование одних и тех же частот, применение различных методов доступа), что делает возможным обеспечение телефонной связью значительного числа абонентов. В работе системы применяется принцип деления некоторой территории на зоны, или "соты", радиусом обычно 0,5–10 километров.

Некоторые технические характеристики действующих в настоящее время в России стандартов системы сотовой радиосвязи приведены в табл. 1.13 [51].

Таблица 1.13

Краткие технические характеристики стандартов системы сотовой радиосвязи (Россия)

| Наименование стандарта | Диапазон рабочих частот БС | Диапазон рабочих частот МРТ | Максимальная излучаемая мощность БС | Максимальная излучаемая мощность МРТ | Радиус "соты" |
|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| NMT-450 аналоговый | 463-467,5 МГц | 453-457,5 МГц | 100 Вт | 1 Вт | 1-40 км |
| AMPS аналоговый | 869-894 МГц | 824-849 МГц | 100 Вт | 0,6 Вт | 2-20 км |
| D-AMPS (IS-136) цифровой | 869-894 МГц | 824-849 МГц | 50 Вт | 0,2 Вт | 0,5-20 км |
| CDMA цифровой | 869-894 МГц | 824-849 МГц | 100 Вт | 0,6 Вт | 2-40 км |
| GSM-900 цифровой | 925-965 МГц | 890-915 МГц | 40 Вт | 0,25 Вт | 0,5-35 км |
| GSM-1800 (DCS) цифровой | 1805-1880 МГц | 1710-1785 МГц | 20 Вт | 0,125 Вт | 0,5-35 км |

Уровни электромагнитного излучения, создаваемые объектами системы сотовой связи, нормируются в соответствии с Гигиеническими нормативами (табл. 1.14) [52].

Таблица 1.14

Временно допустимые уровни воздействия электромагнитного излучения, создаваемого системами сотовой радиосвязи (для населения)

| Категория облучения | Величина ВДУ ЭМИ | Примечание |
|--|--|--|
| Облучение населения, проживающего на прилегающей территории, от антенн базовых станций | $ППЭ_{\text{нд}} = 10 \text{ мкВт/см}^2$ | |
| Облучение пользователей радиотелефонов | $ППЭ_{\text{пду}} = 100 \text{ мкВт/см}^2$ | Условия измерения: Измерения ППЭ следует производить на расстоянии от источника ЭМИ, соответствующего расположению головы человека, подвергающегося облучению |

Базовые станции

Базовые станции поддерживают связь с находящимися в их зоне действия мобильными радиотелефонами и работают в режиме приема и передачи сигнала. В зависимости от стандарта, БС излучают электромагнитную энергию в диапазоне частот от 463 до 1880 МГц.

Антенны БС устанавливаются на высоте 15–100 метров от поверхности земли на уже существующих постройках (общественных, служебных, производственных и жилых зданиях, дымовых трубах промышленных предприятий и т. д.) или на специально сооруженных мачтах [53].

К выбору места размещения антенн БС с точки зрения санитарно-гигиенического надзора не предъявляется никаких иных требований, кроме соответствия интенсивности электромагнитного излучения значениям предельно допустимых уровней, установленных действующими Санитарными правилами и нормами “Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона” в местах, определенных этими Санитарными правилами и нормами [54].

Среди установленных в одном месте антенн БС имеются как передающие (или приемопередающие), так и приемные антенны, которые не являются источниками ЭМИ.

Передающие (приемопередающие) антенны БС могут быть двух типов:

- с круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости (тип «Omni») – рис. 1.10;
- направленные (секторные) – рис. 1.11.

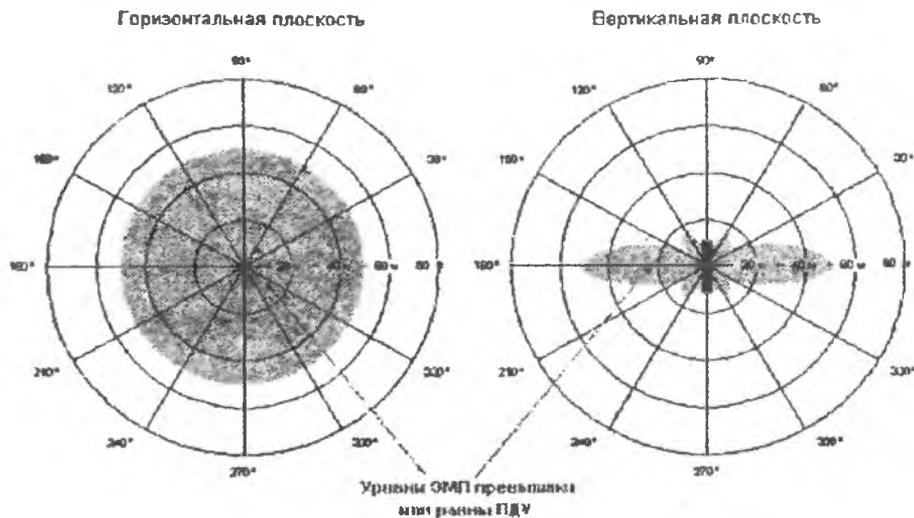


Рис. 1.10. Диаграмма направленности антенны типа "Omni"



Рис. 1.11. Диаграмма направленности секторной антенны

Исходя из технологических требований построения системы сотовой связи, диаграмма направленности антенн в вертикальной плоскости рассчитана таким образом, что основная энергия излучения (более 90%) сосредоточена в довольно узком "луче" (рис. 1.12). Он всегда направлен в сторону от сооружений, на которых находятся антенны БС, и выше прилегающих построек, что является необходимым условием для нормального функционирования системы.

БС являются видом передающих радиотехнических объектов, мощность излучения которых (загрузка) не является постоянной 24 часа в сутки. Загрузка определяется наличием владельцев сотовых телефонов в зоне обслуживания конкретной базовой станции и их желанием воспользоваться телефоном для разговора, что, в свою очередь, коренным образом зависит от времени суток, места расположения БС, дня недели и др. В ночные часы загрузка БС практически равна нулю, т. е. станции в основном "молчат". Типичные графики суточной загрузки БС, расположенных в центре Москвы, в районе массовой жилой застройки и в Московской области в рабочие дни представлены на рис. 1.13.

Исследования электромагнитной обстановки на территории, прилегающей к БС, были проведены специалистами разных стран, в том числе Швеции, Венгрии и России. По результатам измерений, проведенных в Москве и Московской области, можно констатировать, что в 100% случаев электромагнитная обстановка в помещениях зданий, на которых установлены антенны БС, не отличалась от фоновой, характерной для данного района в данном диапазоне частот. На

прилегающей территории в 91% случаев электромагнитного поля были в 50 раз меньше ПДУ, Максимальное значение при измерениях, меньшее зафиксировано вблизи здания, на котором установлено сразу разных стандартов.

таблицы 1.15
"ОТК"
РЕЗУЛЬТАТЫ
ДОБРОВОЛЬНОГО



Рис. 1.12. Распределение энергии излучения антенны БС

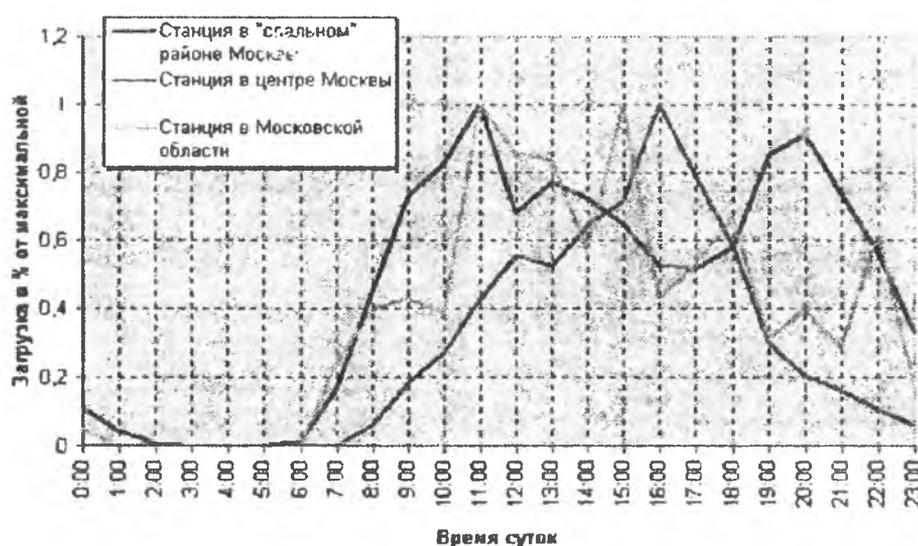


Рис. 1.13. График суточной загрузки БС

Имеющиеся научные данные и существующая система санитарно-гигиенического контроля при введении в эксплуатацию базовых станций сотовой связи позволяют отнести базовые станции сотовой связи к наиболее экологически и санитарно-гигиенически безопасным системам связи.

Мобильные радиотелефоны

Мобильный радиотелефон (МРТ) представляет собой малогабаритный приемопередатчик. В зависимости от стандарта телефона, передача ведется в диапазоне частот 453-1785 МГц. Мощность излучения МРТ является величиной переменной, в значительной степени зависящей от состояния канала связи "мобильный радиотелефон – базовая станция", т.е. чем выше уровень сигнала БС в месте приема, тем меньше мощность излучения МРТ. Максимальная мощность находится в границах 0,125–1 Вт, однако в реальной обстановке она обычно не превышает 0,05-0,2 Вт [55].

Вопрос о воздействии излучения МРТ на организм пользователя до сих пор остается открытым [56]. Многочисленные исследования, проведенные учеными разных стран, включая Россию, на биологических объектах (в том числе, на

добровольцах), привели к неоднозначным, иногда противоречащим друг другу, результатам. Неоспоримым остается лишь тот факт, что организм человека "откликается" на наличие излучения сотового телефона. Поэтому владельцам МРТ рекомендуется соблюдать некоторые меры предосторожности:

- не пользуйтесь сотовым телефоном без необходимости;
- не допускайте, чтобы МРТ пользовались дети;
- при покупке выбирайте сотовый телефон с меньшей максимальной мощностью излучения;
- в автомобиле используйте МРТ совместно с системой громкоговорящей связи "hands-free" с внешней антенной, которую лучше всего располагать в геометрическом центре крыши.

Первая группа результатов измерения удельной поглощенной мощности (SAR) представлено доктором Niels Kuster из лаборатории электромагнитных полей и микроволновой электроники из Федерального Института Технологий в Цюрихе, Швейцария. Впервые результаты были показаны в ходе швейцарского телевизионного шоу для потребителей Kassensturz 21 октября 1997 года. На следующий день они появились в шведской газете "Aftonbladet" и норвежской "Verdens Gang".

Каждый телефон тестировался в 16 различных позициях, так как это определено в паневропейском стандарте CENELEC: с расположением телефона на левой и правой стороне от головы манекена в четырех различных позициях. Испытания были как с выдвинутой, так и задвинутой антенной. После определения положения телефона с максимальной SAR, Kuster измерял в этом положении SAR от еще двух экземпляров телефона той же модели. Значение SAR представленное в Табл. 1.15 есть максимальная величина [57].

Измеренный максимум SAR отражает ситуацию для 90% пользователей, включая детей, с точностью до 25% и повторяемостью до 5.

Все тестируемые телефоны были цифрового стандарта GSM-900 с выходной мощностью 0,25 Вт (табл. 1.15).

Таблица 1.15

SAR телефонов различных фирм-производителей

| Производитель | Модель | Измеренное SAR (Вт/кг) при 0,25 Вт выходной мощности на 10 г веса |
|---------------|----------------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Alcatel | One Touch | 0,68 |
| Alcatel | One Touch Club | 0,69 |
| Alcatel | One Touch 501 | 0,62-0,79 |
| Ascom | Axento | 1,25 |
| Benefon | Twin Dual | 1,01 |
| Benefon | Q | 1,45 |
| Bosch | GSM-908 | 1,59 |
| Bosch | GSM-909 | 1,13 |

| 1 | 2 | 3 |
|------------|---------------------------|-----------|
| Bosch | M-Com 906 | 1,32 |
| Bosch | World-718 | 0,33 |
| Bosch | 908 | 1,59 |
| Bosch | 909 Dual S | 0,81 |
| Ericsson | A1018s | 0,88 |
| Ericsson | A1228D | 1,35 |
| Ericsson | A2618s | 0,79 |
| Ericsson | A2628s | 0,62 |
| Ericsson | GH628 | 0,26 |
| Ericsson | GH688 | 0,95 |
| Ericsson | i888 World | 0,69 |
| Ericsson | LX-588 | 1,51 |
| Ericsson | R310s | 0,94 |
| Ericsson | R320s | 0,75-0,94 |
| Ericsson | R380s | 0,45-0,90 |
| Ericsson | S828 | 0,77 |
| Ericsson | SH888 | 0,42 |
| Ericsson | T18s | 0,61 |
| Ericsson | T20s | 0,76-1,07 |
| Ericsson | T28 World GSM (T28s) | 1,49 |
| Hagenuk | Global | 0,28 |
| Mitsubishi | Trium Aria | 0,48 |
| Motorola | 1611 | 1,06 |
| Motorola | d160 | 0,81 |
| Motorola | cd930 | 0,94 |
| Motorola | P7389 | 1 |
| Motorola | Startac 130-fixed antenna | 0,38 |
| Motorola | StarTac 70 | 0,02 |
| Motorola | StarTac 130 | 0,38 |
| Motorola | T2288 | 0,54 |
| Motorola | Timeport 9250 | 1 |
| Motorola | Timeport L7089 | 1 |
| Motorola | Timeport 250 | 0,52-0,83 |
| Motorola | Timeport P7389 | 0,83 |
| Motorola | v3688 | 1,58 |
| Motorola | v2288 | 0,54-0,68 |
| Motorola | v3690 | 1,07-1,13 |
| Motorola | v50 | 0,33 |
| NEC | DB4000 | 1,23 |
| Nokia | 2110 | 0,44 |
| Nokia | 3110 | 1,24 |
| Nokia | 3210 | 1,14 |
| Nokia | 3310 | 0,75 |
| Nokia | 3330 | 0,75 |
| Nokia | 6110 | 0,87 |
| Nokia | 6150 | 0,71-0,98 |

| 1 | 2 | 3 |
|-----------|--------------------------|-----------|
| Nokia | 6210 | 1,19 |
| Nokia | 6250 | 0,33-0,91 |
| Nokia | 7110 | 0,76-0,94 |
| Nokia | 8110i | 0,73 |
| Nokia | 8210 | 0,72 |
| Nokia | 8810 | 0,22 |
| Nokia | 8850 | 0,22 |
| Nokia | 8890 | 0,53-0,94 |
| Panasonic | EB-G250 | 0,95 |
| Panasonic | EB-G500 | 0,98 |
| Panasonic | EB-GD92 | 0,97-1,07 |
| Panasonic | EB-GD93 | 0,38-1,00 |
| Philips | Diga | 1,06 |
| Philips | Genie | 1,05 |
| Philips | Genie 1800 | 1,26 |
| Philips | Genie 1800-fixed antenna | 1,41 |
| Philips | Genie 900 | 1,52 |
| Philips | Genie db | 1,41 |
| Philips | Savy | 1,11 |
| Philips | Xenium | 0,77-1,14 |
| Philips | Azalis | 0,68 |
| Philips | Ozeo | 0,65 |
| Philips | Savvy | 1,11 |
| Samsung | SGH-2400 | 0,95-1,07 |
| Samsung | SGH-M100 | 0,94 |
| Samsung | SGH-N100 | 1,38 |
| Sharp | TQ G700 | 1,01 |
| Siemens | C25 | 1,33 |
| Siemens | C35i | 1,45 |
| Siemens | S10 | 0,5 |
| Siemens | S25 | 1,33 |
| Siemens | S35i | 0,99 |
| Siemens | SL45 | 0,75-0,97 |
| Siemens | S40 | 0,21 |
| Siemens | M35i | 1,14 |
| Sony | CMD-C1 | 0,55 |
| Sony | CMD-J5 | 0,71-1,06 |
| Sony | CMDX-1000 | 0,41 |
| Sony | CMD-Z1 | 0,88 |
| Sony | CMD-Z5 | 1,06-1,20 |
| Trium | Cosmo | 0,72 |
| Trium | Mars | 0,76 |

Kuster измерял SAR из расчета поглощения на 10 г веса, как предписывают европейские стандарты, вводящие ПДУ в 2 Вт/кг.

SAR - Specific Adsorption Rate: удельная поглощенная мощность, выраженная на единицу массы тела. В единицах СИ SAR определяется в ваттах на 1 кг (Вт/кг). SAR может отражать как среднее значение поглощенной мощности всем телом или его частью, так и за определенный промежуток времени или за 1 импульс. Она может быть рассчитана теоретически или оценена экспериментально.

Специалисты Центра электромагнитной безопасности России провели медико-биологические эксперименты по исследованию влияния на физиологическое и гормональное состояние человека электромагнитного излучения мобильных телефонов существующих и перспективных стандартов сотовой связи.

При работе мобильного телефона электромагнитное излучение воспринимается не только приемником базовой станции, но и телом пользователя, и в первую очередь его головой. Что при этом происходит в организме человека, насколько это воздействие опасно для здоровья?

Однозначного ответа на этот вопрос до сих пор не существует. Однако эксперимент российских ученых показал, что мозг человека не только ощущает электромагнитное излучение сотового телефона, но и различает стандарты сотовой связи.

В опытах использовались телефоны:

- стандарта NMT-450, имеющего в России статус федерального (аппарат Nokia 450),
- действующего европейского стандарта GSM-900 (аппарат Siemens S4),
- перспективного стандарта GSM-1800 (аппарат Motorola PT-9s).

Все эти стандарты активно применяются операторами сотовой связи России.

Испытатели-добровольцы облучались ЭМИ мобильных телефонов трех различных систем в течение 30 минут, при этом они не знали, какой аппарат излучает в данной серии эксперимента, включен он или нет. На голове испытуемого закрепляли датчик для контроля электроэнцефалограммы от 6 областей коры головного мозга, а на теле – датчики для контроля сердечно-сосудистой и дыхательной деятельности, мышечной активности. Эксперимент начинался с того, что записывались исходные параметры деятельности организма испытуемого. Затем сотовый телефон включали в режим излучения. В неизвестный для испытуемого момент телефон отключали и продолжали запись показателей, фиксируя последствия воздействия ЭМИ.

Результаты эксперимента свидетельствуют о достоверных изменениях в биоэлектрической активности мозга человека только в сериях с радиотелефонами стандартов NMT-450 и GSM-900. У большинства испытуемых и во время, и после облучения ЭМИ радиотелефона в спектрах электроэнцефалограммы усиливался альфа-диапазон биоэлектрической активности мозга. Особенно сильно эти изменения проявлялись непосредственно после выключения поля.

Изменения в биоэлектрической активности мозга не зависят от времени “разговора” (5, 10 или 20 минут непрерывно), зато сохраняются в течение 15-20 минут и после окончания воздействия. Другие показатели (частота пульса,

дыхания, электромиограмма, тремор, артериальное давление) не реагировали на факт облучения электромагнитным полем радиотелефона.

Руководитель исследовательского проекта доктор медицинских наук Юрий Григорьев считает, что сотовые телефоны стандартов NMT-450 и GSM-900 вызывали достоверные и заслуживающие внимания изменения в биоэлектрической активности головного мозга. Однако клинически значимых последствий для организма человека однократное 30-минутное облучение электромагнитным полем мобильного телефона не оказывает. Отсутствие достоверных измерений в электроэнцефалограмме в случае использования телефона стандарта GSM-1800 может характеризовать его как наиболее “щадящий” для пользователя из трех использованных в эксперименте систем связи.

Профессор Юрий Григорьев отмечает, что для испытаний были специально подобраны добровольцы – здоровые мужчины. А в дальнейших исследованиях намечено проследить зависимость состояния здоровья различных групп людей (по признакам пола, возраста, самочувствия) от условий облучения и режима пользования сотовым телефоном. Эти исследования помогут выявить условия, при которых может проявляться неблагоприятное влияние сотового телефона на здоровье человека.

Комментируя результаты экспериментов, сотрудник Института биофизики доктор биологических наук Светлана Лукьянова сообщила, что полученные в эксперименте данные полностью соответствуют известным в радиобиологии фактам о последствиях влияния низкоинтенсивных однократных воздействий электромагнитного поля на организм человека. Описанные изменения в деятельности центральной нервной системы не выходят за рамки нормального функционирования организма и трактуются в физиологии как защитная реакция. С другой стороны, убедительно показано, что последствия зависят как от величины воздействующего электромагнитного излучения, так и от несущей частоты и модуляции радиосигнала.

Очевидно, что никакие предостережения не могут остановить стремительный рост числа абонентов сотовой связи. Именно поэтому специалисты во всем мире видят свою задачу в выработке четких рекомендаций для создания нового поколения техники, работающей в так называемом щадящем режиме воздействия.

1.3.2.7. Теле- и радиостанции

Передающие радиоцентры (ПРЦ) размещаются в специально отведенных для них зонах и могут занимать довольно большие территории (до 1000 га). По своей структуре они включают в себя одно или несколько технических зданий, где находятся радиопередатчики, и антенные поля, на которых располагаются до нескольких десятков АФС. Антенно-фидерная система (АФС) включает в себя антенну, служащую для излучения радиоволн, и фидерную линию, подводящую к ней высокочастотную энергию, генерируемую передатчиком [58].

Зону возможного неблагоприятного действия ЭМИ, создаваемых ПРЦ, можно условно разделить на две части [59].

Первая часть зоны - это собственно территория ПРЦ, где размещены все службы, обеспечивающие работу радиопередатчиков и АФС. Это территория охраняется, и на нее допускаются только лица, профессионально связанные с обслуживанием передатчиков, коммутаторов и АФС. Вторая часть зоны - это прилегающие к ПРЦ территории, доступ на которые не ограничен и где могут размещаться жилые различные постройки, в этом случае возникает угроза облучения населения, находящегося в этой части зоны.

Высокие уровни ЭМИ наблюдаются на территориях, а нередко и за пределами размещения передающих радиостанций низкой, средней и высокой частоты (ПРЦ НЧ, СЧ и ВЧ). Детальный анализ электромагнитной обстановки на территориях ПРЦ свидетельствует о ее крайней сложности, связанной с индивидуальным характером интенсивности и распределения ЭМИ для каждого радиостанции. В связи с этим специальные исследования такого рода проводятся для каждого отдельного ПРЦ [60].

Широко распространенными источниками ЭМИ в населенных местах в настоящее время являются радиотехнические передающие центры (РТЦ), излучающие в окружающую среду ультракороткие волны ОВЧ и УВЧ-диапазонов [61].

Сравнительный анализ СЗЗ и зон ограничения застройки в зоне действия таких объектов показал, что наибольшие уровни облучения людей и окружающей среды наблюдаются в районе размещения РТЦ «старой постройки» с высотой антенной опоры не более 180 м. Наибольший вклад в суммарную интенсивность воздействия вносят «уголковые» трех- и шестиэтажные антенны ОВЧ ЧМ-вещания [62].

Радиостанции ДВ (частоты 30-300 кГц).

В этом диапазоне длина волн относительно большая (например, 2000 м для частоты 150 кГц) [63]. На расстоянии одной длины волны или меньше от антенны поле может быть достаточно большим, например, на расстоянии 30 м от антенны передатчика мощностью 500 кВт, работающего на частоте 145 кГц, электрическое поле может быть выше 630 В/м, а магнитное - выше 1,2 А/м [64].

Радиостанции СВ (частоты 300 кГц-3 МГц).

Данные для радиостанций этого типа говорят, что напряженность электрического поля на расстоянии 200 м может достигать 10 В/м, на расстоянии 100 м - 25 В/м, на расстоянии 30 м - 275 В/м (приведены данные для передатчика мощностью 50 кВт) [65].

Радиостанции КВ (частоты 3-30 МГц).

Передатчики радиостанций КВ имеют обычно меньшую мощность. Однако они чаще размещаются в городах, могут быть размещены даже на крышах жилых зданий на высоте 10-100 м. Передатчик мощностью 100 кВт на расстоянии 100 м

может создавать напряженность электрического поля 44 В/м и магнитного поля 0,12 А/м.

Телевизионные передатчики.

Телевизионные передатчики располагаются, как правило, в городах. Передающие антенны размещаются обычно на высоте выше 110 м. С точки зрения оценки влияния на здоровье интерес представляют уровни поля на расстоянии от нескольких десятков метров до нескольких километров [66]. Типичные значения напряженности электрического поля могут достигать 15 В/м на расстоянии 1 км от передатчика мощностью 1 МВт. В настоящее время проблема оценки уровня ЭМИ телевизионных передатчиков особенно актуальна в связи с резким ростом числа телевизионных каналов и передающих станций [67].

1.3.2.8. Спутниковая связь

Системы спутниковой связи состоят из приемопередающей станции на Земле и спутника, находящегося на орбите. Диаграмма направленности антенны станций спутниковой связи имеет ярко выраженный узконаправленный основной луч - главный лепесток. Плотность потока энергии в главном лепестке диаграммы направленности может достигать нескольких сотен Вт/м² вблизи антенны, создавая также значительные уровни поля на большом удалении. Например, станция мощностью 225 кВт, работающая на частоте 2,38 ГГц, создает на расстоянии 100 км ППЭ равное 2,8 Вт/м². Однако рассеяние энергии от основного луча очень небольшое и происходит больше всего в районе размещения антенны [68].

Типичный расчетный график распределения ППЭ на высоте 2 м от поверхности земли в районе размещения антенны спутниковой связи приведен на рис. 1.14.

Существуют два возможных опасных случая облучения:

- непосредственно в районе размещения антенны;
- при приближении к оси главного луча на всем его протяжении.

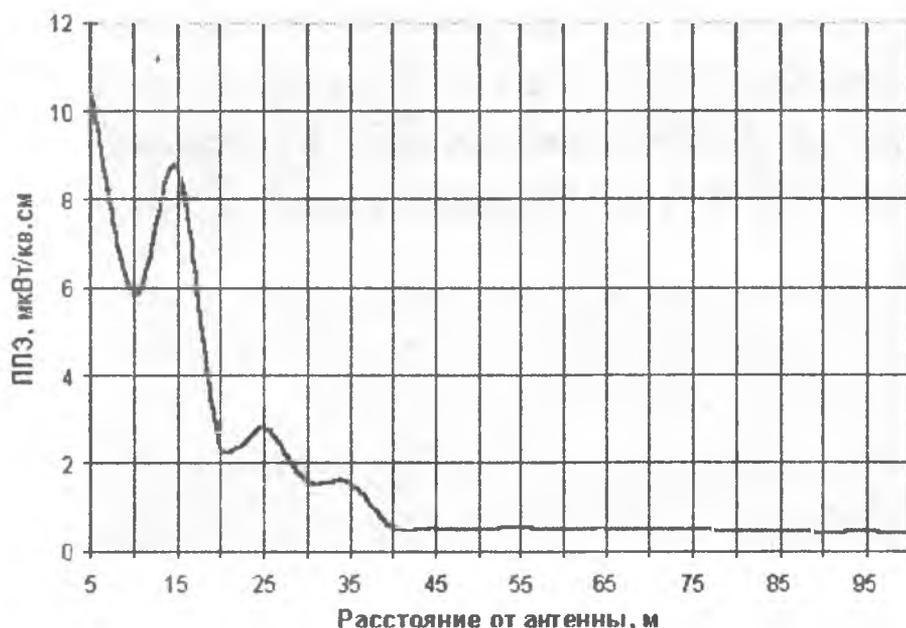


Рис. 1.14. График распределения плотности потока электромагнитного поля на высоте 2 м от поверхности земли в районе установки антенны спутниковой связи

| | |
|---|-----|
| Высота расположения антенны над землей, м | 4,8 |
| Диаметр антенны, м | 5,5 |
| Мощность, излучаемая антенной, Вт | 134 |
| Угол наклона антенны относительно горизонта, градус | 10 |
| Высота линии расчета плотности потока энергии, м | 2 |
| Азимут линии расчета плотности потока энергии, градус | 0 |

1.3.2.9. Радиолокационные системы

Радиолокационные станции оснащены, как правило, антеннами зеркального типа и имеют узконаправленную диаграмму излучения в виде луча, направленного вдоль оптической оси [69].

Радиолокационные системы работают на частотах от 500 МГц до 15 ГГц, однако, отдельные системы могут работать на частотах до 100 ГГц. Создаваемый ими электромагнитный сигнал принципиально отличается от излучения иных источников [70]. Связано это с тем, что периодическое перемещение антенны в пространстве приводит к пространственной прерывистости облучения. Временная прерывистость облучения обусловлена цикличностью работы радиолокатора на излучение. Время наработки в различных режимах работы радиотехнических средств может исчисляться от нескольких часов до суток. Так у метеорологических радиолокаторов с временной прерывистостью 30 мин излучение, 30 мин пауза суммарная наработка не превышает 12 ч, в то время как радиолокационные станции аэропортов в большинстве случаев работают круглосуточно. Ширина диаграммы направленности в горизонтальной плоскости обычно составляет несколько градусов, а длительность облучения за период обзора составляет десятки миллисекунд [71].

Радары метеорологические могут создавать на удалении 1 км ППЭ около 100 Вт/м^2 за каждый цикл облучения. Радиолокационные станции аэропортов создают ППЭ около $0,5 \text{ Вт/м}^2$ на расстоянии 60 м. Морское радиолокационное оборудование устанавливается на всех кораблях, обычно оно имеет мощность передатчика на порядок меньшую, чем у аэродромных радаров, поэтому в обычном режиме сканирование ППЭ, создаваемое на расстоянии нескольких метров, не превышает 10 Вт/м^2 . Сравнение уровней создаваемых радаром полей с другими источниками СВЧ диапазона приведено на рис. 1.15.

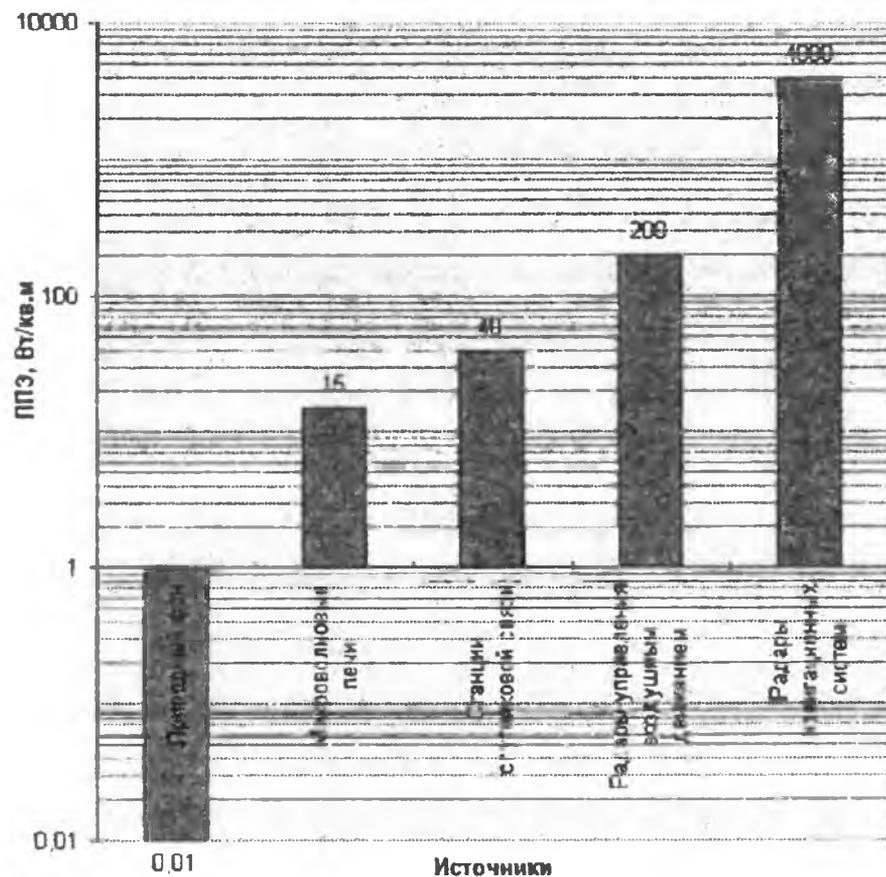


Рис. 1.15. Уровни ЭМП радаров в сравнении с другими источниками СВЧ диапазона

Возрастание мощности радиолокаторов различного назначения и использование остронаправленных антенн кругового обзора приводит к значительному увеличению интенсивности ЭМИ СВЧ диапазона и создает на местности зоны большой протяженности с высокой плотностью потока энергии [72].

1.3.2.10. Электромагнитное оружие

Разработка оружия происходит в направлениях не только совершенствования огнестрельного оружия в виде высокоточных средств поражения традиционного типа, но и внедрения оружия на новых физических принципах - оружия направленной энергии.

Электронные системы вооружения развиваются в направлениях обеспечения не только борьбы оружия с оружием, но и информационной борьбы с подавлением информационно-управляющих систем противника. Это позволяет вести "бескровную", не летальную борьбу, не давая возможности применять обычные оружейные системы.

По сообщению UPI [73], недавно на базе корпуса морской пехоты США «Куантико» в штате Вирджиния прошли успешные испытания «оружия направленной энергии». Принцип его действия заключается в том, что установка излучает направленные электромагнитные волны, которые проникают сквозь одежду противника и быстро - за 2 секунды - нагревают поверхность тела до $+54^{\circ}\text{C}$. Болевые ощущения человек начинает испытывать уже при $+45^{\circ}\text{C}$. При этом новое «полицейское» оружие не наносит никаких повреждений и не затрагивает внутренние органы.

Эксперты министерства обороны США считают, что это оружие может применяться как для разгона демонстрантов, так и в реальном бою и у него большое

будущее. На разработку этой технологии Пентагон потратил 10 лет и 40 миллионов долларов.

Разработана так называемая "электромагнитная бомба", взрыв которой порождает электромагнитный импульс, уничтожающий всевозможные электронные системы. Основным элементом является цилиндрический резонатор из материала с хорошей электропроводностью, обложенный взрывчаткой (рис. 1.16) [74]. Специальный источник, даже маломощный, установленный на самой бомбе или на самолете, который ее доставляет, инициирует в резонаторе стоячую электромагнитную волну. Ее можно либо поддерживать во времени, либо создавать за несколько мгновений до взрыва. Обычно при взрыве развивается мощность в несколько тысяч гигаватт, а давление - более сотни атмосфер. Оно сжимает резонатор. В зависимости от конструкции бомбы сжатие происходит либо равномерно по всей боковой поверхности, либо с торца.

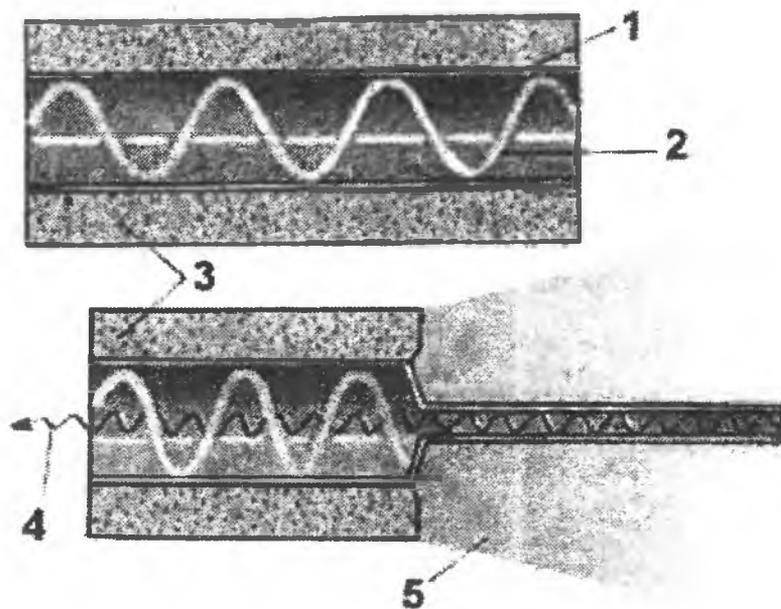


Рис. 1.16. Возможная схема функционирования электромагнитной бомбы перед взрывом: 1 - электромагнитный резонатор; 2 - стоячая волна; 3 - взрывчатое вещество; 4 - направленное ЭМИ; 5 - разлетающиеся продукты взрыва

Почти мгновенно диаметр цилиндра уменьшается в десятки раз. Электромагнитное поле, не способное выйти за пределы резонатора, резко сжимается и, как следствие, повышается частота его колебаний. Так часть энергии переходит в энергию электромагнитных колебаний. По сравнению с первоначальной их мощность возрастает в тысячи раз. В этот момент и происходит взрыв - один из торцов резонатора разрушается, например, пиропатроном, и стоячая волна превращается в бегущую волну мощностью около 10 ГВт. Она уничтожает всю встречающуюся на пути электронику. Радиус поражения составляет порядка 200 м (рис. 1.17).

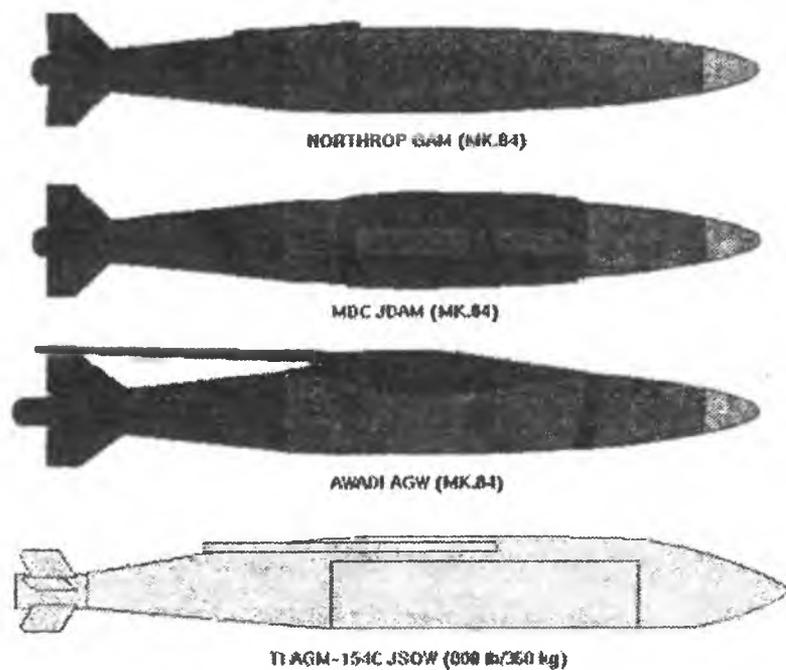


Рис. 1.17. Схематичное изображение некоторых конструкций электромагнитных бомб

Основная особенность данного вида оружия в том, что, по утверждению разработчиков, оно, не воздействуя на личный состав противника, выводит из строя компьютеры, телекоммуникации и прочее электронное оборудование. Электромагнитный импульс может вывести из строя даже те электронные системы, которые находятся глубоко под землей — в этом случае разрушающее действие передается через телефонные линии и электрические кабели. В ходе последних боевых действий в Ираке вооруженными силами США был применен такой вид оружия в Багдаде. В результате чего на длительное время был выведен из строя телевизионный центр. Однако электромагнитная энергия такой мощности вызывает нарушение и в работе человеческого мозга на незначительный промежуток времени, последствия такого влияния на человеческий организм окончательно не выяснены [75].

Терроризм в последнее время не считается новым явлением. Опаснейшей его разновидностью является электромагнитный терроризм [76]. Его проявление заключается в создании мощного электромагнитного импульса, воздействующего на электронные компоненты аппаратуры разнообразного назначения с целью выведения ее из строя. Уникальностью данного воздействия является отсутствие его следов, оно не требует от террористов защиты и маскировки, может осуществляться по большому числу целей, дистанционно и с использованием мобильных средств. Последствия электромагнитного терроризма по своим масштабам сопоставимы с последствиями взрыва жилого многоквартирного дома. Возможно полное нарушение в работе систем управления вооружением, жизнеобеспечением, теле- и радиотрансляционных центров, систем связи, навигации и т.п. Следствиями такой атаки вполне могут стать пожар или экологическая катастрофа.

1.4. Взаимодействие электромагнитного излучения с биологическими объектами

При взаимодействии ЭМИ с биологическими объектами (в частности с человеческим организмом) мощности источников излучения и время воздействия

ЭМП определяются нормативными документами – СНиП (СанПиН) и ГОСТ. Частотный диапазон источников ЭМИ подразделяется на достаточно широкие участки (табл. 1.16), а предельно допустимые уровни ЭМП составляют величины (5 мкВт/см^2 при постоянном облучении), которые обеспечиваются при малом удалении от излучателей, значительной мощности генератора или узкой направленности излучения.

Таблица 1.16

Деление радиоволн по воздействию на биологические объекты

| Диапазон частот | Номинальная мощность источника ЭМИ |
|-------------------|------------------------------------|
| 60 кГц – 3 МГц | 2,5 Вт |
| 3 – 30 МГц | 400 мВт |
| 30 – 50 МГц | 100 мВт |
| 50 – 300 МГц | 25 мВт |
| 300 МГц – 300 ГГц | 100 мВт |

Однако механизм взаимодействия ЭМИ с человеческим организмом при воздействии малых доз до конца не изучен [77]. Биологами отмечаются как положительные, так и отрицательные результаты при облучении биологических систем низкоэнергетическими переменными электромагнитными полями. Возникает необходимость защиты объектов от негативного воздействия ЭМП [78].

В настоящее время существует несколько подходов, определяющих границы радиочастотного диапазона в зависимости от условий распространения, вредности воздействия и применения электромагнитного поля. С гигиенической точки зрения к радиочастотному диапазону можно отнести колебания частотой от 30 кГц до 300 ГГц. Однако также необходимо рассматривать влияние излучений промышленной частоты 50 Гц, ультранизких частот, начиная от нескольких герц до килогерц, электростатического поля, оказывающих явно выраженное биологическое воздействие [79].

Наблюдения и результаты экспериментов последних лет показывают, что ЭМИ космического, земного и околоземного происхождения играют значительную роль в развитии жизни на Земле. Так, давно известна высокая степень влияния солнечной активности на все виды биологической деятельности организмов: состав крови, лимфы и клеточные протоплазмы, а также на рост эпидемий разных инфекционных заболеваний, скорость размножения рыб, насекомых и некоторых млекопитающих. С изменением интенсивности геомагнитного поля тесно коррелируют годовой прирост деревьев, урожай зерновых культур, число инфарктов миокарда, психических заболеваний и даже число дорожных несчастных случаев. Установлено, что цикличность этих изменений оказывает регулирующее действие, а резкие аритмические изменения приводят к нарушению процессов жизнедеятельности, особенно заметных в период становления организма и в патологическом состоянии [80].

Биологическое воздействие электромагнитных излучений обычно связывают с их тепловым и нетепловым воздействием, однако взаимодействие живых объектов с ЭМИ представляет собой интегральную реакцию и связано с адаптационными, кумуляционными и сенсбилизационными способностями организма [81].

Основными факторами излучения, влияющими на нагрев и глубину проникновения волн, являются частота и мощность электромагнитного поля, причем в зависимости от частотного диапазона излучения человеческое тело может рассматриваться как проводящая, так и диэлектрическая среда. При нетепловом воздействии следует учитывать и информационные параметры поля (вид модуляции, ее частоту, поляризацию волны) [82].

ЭМИ радиочастотного диапазона могут вызывать заболевания нервной, сердечно-сосудистой, дыхательной систем, изменять показатели крови, обмена веществ. При длительном воздействии СВЧ излучений могут иметь место изменения в крови, помутнение хрусталика, нервно-психологические заболевания, нарушение работы механизмов адаптации организма к изменениям условий внешней среды, а при увеличении энергии излучений – к нагреванию тканей, ожогам [83].

Поэтому параметры электромагнитного поля, достигающие весьма значительных величин по отношению к тем, к которым человек и другие биологические объекты приспособились в течение эволюционного развития, могут обуславливать функциональные сдвиги, в ряде случаев перерастающие в заболевания [84].

Биоэффекты, получаемые при воздействии излучений, связывали главным образом с тепловым и нетепловым (специфическим) действием ЭМИ. Однако, учитывая тот факт, что взаимодействие ЭМИ с биологическими объектами является интегральной реакцией, такое разделение является весьма условным, и поэтому говорить можно лишь о качественном различии взаимодействия ЭМИ с биологическими объектами, обусловленном интенсивностью излучения и адаптационными возможностями биологической системы [85].

Нетепловое, или специфическое действие электромагнитного поля сводится к тончайшим изменениям в организме, обусловленным сильными и слабыми взаимодействиями ЭМИ с облучаемой средой. К первому типу относятся эффекты насыщения диэлектрика, ориентации поля и другие, которые возникают при сильных полях. Возможным физическим механизмом слабого взаимодействия нетеплового характера является резонансное поглощение электромагнитной энергии белковыми молекулами, с которым связывают, в частности, мутагенное действие СВЧ радиоволн.

При взаимодействии ЭМИ с биологическими системами кроме простейших физико-химических эффектов имеют место и вторичные эффекты, связанные с физиологическими механизмами, в частности, кумуляция, стимуляция и сенсбилизация [86, 87].

Кумуляция заключается в том, что при воздействии прерывистого облучения эффект зависит от суммарной величины воздействия поля.

Стимулирующее действие ЭМП проявляется в улучшении общего состояния организма или чувствительности отдельных его анализаторов. Например, при воздействии дотепловых плотностей энергии ЭМП на организм улучшается чувствительность глаз человека, адаптированных к темноте.

Сенсибилизация заключается в повышении чувствительности организма после слабого воздействия ЭМП к последующему облучению.

Наиболее общим эффектом действия ЭМП малых плотностей энергии (единицы мВт/см²) на организм человека является нарушение работы механизмов адаптации организма к изменениям условий внешней среды (холод, шум, психическая травма и т.п.).

Электромагнитная энергия СВЧ и УВЧ диапазона обладает выраженным биологическим действием [88]. При систематическом действии на организм человека уровней электромагнитной энергии (ЭМЭ), превышающих предельно допустимый уровень (ПДУ), вначале возникают компенсаторно-приспособительные реакции, являющиеся общими неспецифическими реакциями организма. Затем, при продолжении облучения, могут развиваться патологические изменения, обычно носящие обратимый характер. И только в редких случаях, если облучение продолжалось в течение многих лет, возникают необратимые изменения со стороны нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем [89].

Степень функциональных нарушений и тяжести патологических изменений зависит от уровня напряженности поля или плотности потока энергии и длительности облучения, а также от индивидуальных особенностей организма. Кроме этого, эффект действия электромагнитного поля зависит от его частоты и параметров модуляции. Данные литературы свидетельствуют о том, что к действию этого фактора более чувствительны больные люди, дети и лица пожилого возраста.

Несмотря на то, что уровни воздействия электромагнитных колебаний оказываются ниже, чем непосредственно влияющие на работоспособность биологических организмов, они играют значительную роль в жизнедеятельности человека.

1.4.1. Взаимодействие ЭМИ с организмом человека. Эффект малых доз

В последние годы все более актуальным объектом исследования становится влияние на человека (и любой другой живой организм) малых доз как физических, так и химических факторов воздействия. Накоплен разнообразный экспериментальный материал, а главное - разработана теория, позволившая показать, что результаты отдельных лабораторных экспериментов (эффект Петко) не могут рассматриваться как случайные. Они демонстрируют общий закон высокой эффективности эндоэргических изотермических процессов, который имеет самое непосредственное отношение к безопасности жизнедеятельности человека в XXI веке, так как именно малые дозы вредного воздействия будут в ближайшее время определять уровень заболеваемости населения промышленных городов [90, 91].

Человек представляет собой сложную систему, состоящую из многих органов и подсистем, которые реагируют на изменения внутренних и внешних условий. Многочисленными исследованиями доказано, что основным носителем информации как внутри биологического объекта, так и между отдельными биологическими объектами, в том числе и между людьми, является электромагнитное излучение [92]. При этом циркуляция огромного потока информации в процессе жизнедеятельности человека возможна только при использовании сигналов малой мощности. Затраты энергии на формирование этих сигналов определяются энергетическими возможностями человека. По оценкам специалистов, суммарная мощность информационных сигналов не превышает $1...10$ мВт или $10^{-3}...10^{-4}$ тепловой мощности, излучаемой организмом, а мощность КВЧ излучения клетки составляет $P_{кл}=10^{-23}$ Вт [93].

Исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными, привели к открытию эффекта сверхмалых доз. Уровень биологической организации, на которой обнаружено действие сверхмалых доз, весьма разнообразен - от клетки, макромолекул, органов и тканей до животных, растительных организмов и целых популяций [94].

Общие закономерности влияния сверхмалых доз биологически активных веществ наиболее ярко проявляются при изучении дозовых зависимостей. В некоторых случаях эта зависимость бимодальная: эффект возрастает при сверхмалых дозах препаратов, затем, по мере увеличения дозы, уменьшается, сменяется так называемой "мертвой зоной", где он не заметен, и вновь усиливается (рис. 1.18, кривая 1). Иногда в дозовой зависимости обнаруживается стадия эффекта "перемены знака". Например, если в области сверхмалых доз отмечалась ингибирующая активность, то по мере роста концентрации она сменялась стимулирующей, а затем вновь ингибирующей (рис. 1.18, кривая 2). В ряде случаев эффект в очень большом диапазоне концентрации почти не зависит от дозы (рис. 1.18, кривая 3.) [95].

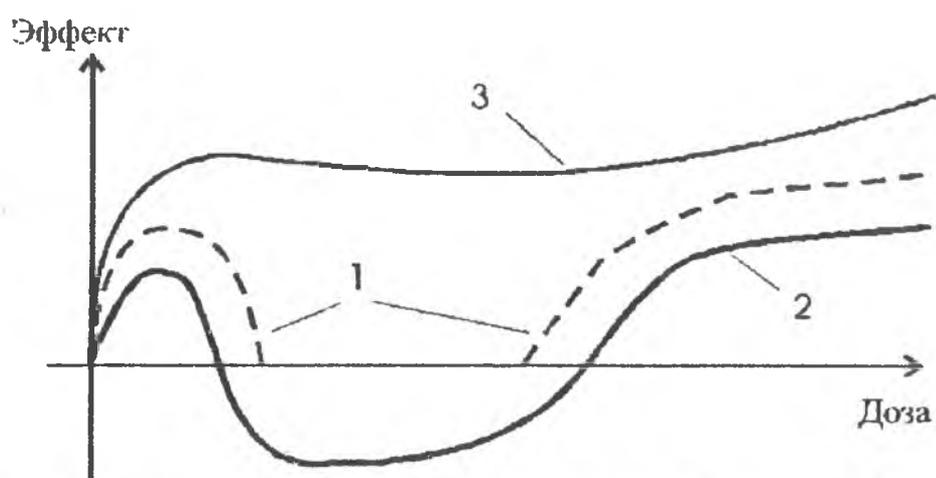


Рис. 1.18. Типы кривых зависимости "доза-эффект"

Обобщение экспериментальных данных, полученных на различных животных и людях, свидетельствует, что воздействие излучений и препаратов может вызывать одинаковую реакцию испытуемых при дозах, отличающихся на 5-10

порядков. Наиболее ярким примером такого воздействия является применение гомеопатических препаратов.

Похожие зависимости наблюдаются и при воздействии СВЧ излучений. Так, на кривой зависимости величины физиологического эффекта от плотности мощности облучения, наблюдаются два максимума (рис. 1.19). Эти максимумы также разделены "мертвой зоной", наличие которой объясняется как результат включения в работу активных барьерных механизмов и компенсирующих систем организма. Когда эти силы перестают справляться, наблюдается тотальное возбуждение, завершающееся срывом и гибелью организма.

Естественно, что в ходе эволюции рецепторная система сформировалась таким образом, что она реагирует только на наиболее значимые сигналы малой интенсивности. Это, например, удалось показать в опытах по выработке у крыс условного рефлекса "избегания" в зависимости от параметров слабого электромагнитного сигнала. Реакция вырабатывалась лучше всего на сигнал с частотой 300 Гц при плотности мощности 10^{-11} Вт/см² [96].



Рис. 1.19. Зависимость эффекта (реакции объекта) от плотности мощности СВЧ излучения

Увеличение или уменьшение плотности мощности облучения на 1-2 порядка без изменения прочих параметров сигнала приводило к невозможности выработки условного рефлекса. К тому же приводило изменение частоты до 500 или 50 Гц.

Отмеченные результаты экспериментальных исследований имеют принципиальное значение, так как они указывают на наличие резонансных параметров облучающего излучения, при которых реализуются и, соответственно, наблюдаются результаты воздействия. Наличием резонансных параметров можно объяснить существование бимодальных дозовых зависимостей.

Особенности резонансных воздействий можно объяснить с помощью результатов теоретических и экспериментальных исследований, проведенных под руководством П.П. Горяева. Эти результаты дают основание утверждать, что первоосновой кодовой иерархии биологических систем являются инфраструктуры

внеклеточных матриц цитомембраны, цитоскелета и ядра клетки. Все изменения в живом организме связаны в первую очередь с изменениями в этих структурах. ДНК, рибосомы и коллаген (основная составляющая часть белков внеклеточных матриц) - главные информационные биополимеры. Между ними в эпигенетическом режиме происходит обмен информацией по физическим каналам нелинейных акустических и электромагнитных колебаний. Кроме того, генераторами и акцепторами информационных волн внутри биообъектов являются различные жидкокристаллические структуры и внутриклеточная вода со способностью образовывать фрактальные структуры.

Экспериментально определены приблизительные резонансные частоты в некоторых структурах живой клетки: соматическая клетка - $2,39 \times 10^{12}$; ядро соматической клетки - $9,55 \times 10^{12}$; митохондрии из клетки печени - $3,18 \times 10^{13}$; геном клетки человека - $2,5 \times 10^{13}$; хромосома интерфазная - $7,5 \times 10^{11}$; хромосома метафазная - $1,5 \times 10^{13}$; ДНК - $(2...9) \times 10^9$; нуклеосома - $4,5 \times 10^{15}$; рибосомы - $2,65 \times 10^{15}$; клеточные мембраны - 5×10^{10} ; цитоскелет - 10^8 ; эритроциты - $(3,5...4,0) \times 10^{10}$.

Одной из главных особенностей реализации резонансных воздействий является мизерная мощность и малое время облучения. Так, аппараты информационно-волновой терапии "Порог-1" и "Минитаг" работают при сверхмалой плотности потока мощности приблизительно 10^{-17} Вт/см² в течение нескольких секунд или минут.

Отмеченные выше резонансные частоты живой клетки совпадают с частотами излучений космических аппаратов связи. Создаваемые же этими аппаратами плотности мощности и длительности облучения будут существенно превышать (на 10 и более порядков - такое облучение возможно в течение всей жизни) энергетические уровни, вызывающие изменения в живых клетках.

Фундаментальным свойством живого, в гораздо большей степени присущим живым организмам, чем природе в целом, является способность к генерированию новых, отсутствовавших ранее свойств и процессов. Прогрессивная эволюция с этой точки зрения представляет собой процесс самоорганизации, выражающийся в самопроизвольном образовании все более сложных структур. Однако любая однажды возникшая структура не является статичной, она может потерять устойчивость либо вследствие изменения условий среды, либо из-за изменения параметров самой системы. Мутации, которые несут селективное преимущество, имеют тенденцию усиливаться, т.е. порождают неустойчивость. Таким образом, естественный отбор фактически основан на неустойчивостях, вызванных появлением благоприятных мутантов, которые приводят к развалу ранее устойчивых структур, а эволюция представляет собой бесконечную смену одних устойчивых состояний другими через неустойчивые состояния.

Такое представление об эволюции хорошо стыкуется с современными представлениями о синергетике. Современный синергизм - это признание роли

малых по энергии флуктуаций, которые в сложных системах могут изменять структуру систем в точке бифуркации.

Считается, что именно низкоэнергетические сигналы влияют на выбор пути дальнейшего развития в момент бифуркации, когда имеется ряд равноценных продолжений.

В результате суперпозиции полей нескольких излучений возможно возникновение стоячих волн, частота которых будет совпадать с резонансными частотами живых клеток и ритмами различных органов и функциональных систем организма. Поэтому появляется вероятность изменения (в том числе и негативного) генетического аппарата живых клеток при длительном воздействии низкоэнергетических электромагнитных излучений космических аппаратов связи. В результате такого воздействия на генетические механизмы транскрипции, трансляции, репарации, а также на механизм экспрессии генов, могут возникать особи отдельных биологических видов с непредсказуемыми свойствами.

Освоение механизма управления экспрессией генов с помощью электромагнитных излучений может открыть двери к управлению поведением и состоянием биологических объектов, вплоть до их клонирования. Использование такого управления даст возможность дистанционно подавлять активность болезнетворных микроорганизмов, бактерий, насекомых и т.д.

В отношении человека возникает опасность того, что у населения облученных территорий могут быть спровоцированы нежелательные последствия на генном и физиологическом уровнях. Так, при облучении организма человека возможно ингибирование ряда участков генома лимфоцитов. Это может привести к различным отклонениям, в первую очередь - к наиболее сложной системе иммунной защиты организма. Такое воздействие позволит путем ингибирования трансляции определенных генов прекратить синтез иммуноцитов, отвечающих за выработку антител к определенному антигену. Спустя некоторое время после воздействия иммунная система облученных будет не в состоянии противостоять инфекции, вызванной антигеном, реакция на который ингибирована, и даже грипп окажется смертоносным.

Поскольку мутации по большей части вредны, ни один биологический вид не может позволить себе быстро накапливать их в своих половых клетках. Сохранение вида требует, чтобы половые клетки организмов были защищены от быстрых генетических изменений, но сохранение каждого конкретного индивидуума требует такой же защиты и для всех остальных клеток организма. Нуклеотидные замены в соматических клетках могут способствовать естественному отбору в пользу тех клеток, которые лучше приспособились к существующим условиям. Это может привести к их неконтролируемому размножению, например, развитию рака, на долю которого в Западном полушарии приходится более 20% преждевременных смертей. Убедительные исследования показывают, что гибель людей в данном случае вызвана главным образом накоплением изменений в последовательностях

ДНК соматических клеток. Десятикратное повышение частоты мутаций привело бы, вероятно, к катастрофическому росту числа раковых заболеваний.

Таким образом, учитывая недостаточную изученность воздействия электромагнитных излучений на биологические объекты, следует отметить необходимость проведения электромагнитного мониторинга окружающей среды с целью контроля над теми процессами в жизни общества, которые могут получить развитие в период активного ввода в действие новых систем и устройств, генерирующих электромагнитное излучение [97, 98, 99].

1.4.2. Влияние электромагнитного излучения на живые организмы и растения

1.4.2.1. Воздействие электромагнитных излучений на адаптивные функции гомеостаза у живых организмов

Широкое внедрение в медицину и ветеринарию достижений электроники, особенно квантовой, имеет уже давние традиции. Обычно применяются газовые лазеры на смеси гелия и неона, параметры которых сведены в табл. 1.17.

Таблица 1.17

Параметры гелиево-неоновых лазеров

| № | Марка | Длина волны, мкм | Мощность, Вт |
|---|---------|------------------|--------------|
| 1 | ЛГ 38 | 0,63 | 0,05 |
| 2 | ЛГ 56 | 0,63 | 0,002 |
| 3 | ЛГ 75 | 0,63 | 0,01 |
| 4 | ЛГ 126 | 0,63; 1,15; 3,39 | 0,01 |
| 5 | ЛГ 25 | 10,6 | 25 |
| 6 | ЛГМ 703 | 10,6 | 40 |
| 7 | ЛГ 61 | 0,44 | 0,06 |
| 8 | ЛГН 503 | 0,488 | 1 |

Лазерное излучение – монохроматичное, строго поляризованное, имеет высокую направленность, фокусируется в достаточно малом диаметре, что позволяет его применять в лечебных целях. Достаточно мощные газовые лазеры с активной средой двуокиси углерода нашли широкое применение в хирургической практике.

Низкоэнергетическое воздействие в инфракрасных (ИК) диапазонах и видимой части спектра на живые организмы обуславливает процессы, происходящие на клеточном и молекулярном уровнях. Обычно выделяют биофизическое и физиологическое действие такого излучения.

Определим основные количественные характеристики излучения:

1. Плотность мощности H – это количество световой энергии на 1 см^2 :

$$H \left[\frac{\text{мВт}}{\text{см}^2} \right] = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{S}; \quad (1.10)$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ – мощность на выходе, мВт;

S – площадь светового пятна, см^2 .

2. Доза, вводимая в ткани:

$$W = \frac{P \cdot T \cdot 10^{-3}}{S}; \quad (1.11)$$

где P – доза облучения, Дж/см²;

T – время облучения, с.

3. Доза облучения:

$$W = \frac{P \cdot T \cdot (1 - a)}{S}; \quad (1.12)$$

где $(1 - a)$ – коэффициент светопропускания ткани, определяемый биофотометрическим путём.

4. Экспозиция облучения T :

$$T[\text{с}] = \frac{W \cdot S}{P \cdot (1 - a)}; \quad (1.13)$$

Рассмотрим кратко биологические действия светового излучения. Следует заметить, что гелиево-неоновые лазеры давно используются в лечебной практике. Кроме указанного типа лазеров в последнее время применяют лазеры инфракрасного (ИК) излучения с длиной волны $\lambda = 0,89$ мкм (890 нм) и лазеры на красителях с длиной волны $\lambda = 0,585$ мкм (585 нм). ИК лазеры на твёрдотельных элементах могут достигать значительных величин излучаемой энергии, особенно в импульсном режиме. Наименования ИК лазеров следующие: “Прометей”, “Узор”, “Урожай” и др. Лазеры на красителях используются сравнительно недавно. Уникальная возможность перестройки частоты излучения таких лазеров позволяет их применять даже при онкологических заболеваниях.

Существует достаточно много гипотез биологического воздействия лазеров, которые сведены в табл. 1.18.

КВЧ-терапия (крайне высокие частоты) получила бурное развитие в последнее время. Для облучения биологических систем КВЧ излучением выпускаются специальные аппараты: “Электроника КВЧ”, “Явь”, “Инициация”, “Арцах”, “Ария”, “Джокер”, “Ялбот”, шумовые генераторы “Порог” и др. Длина излучаемой волны перечисленных аппаратов лежит в миллиметровом диапазоне.

В табл. 1.19 кратко приведены сведения о биологических эффектах воздействия миллиметровых волн на живые организмы [100].

Порог чувствительности биологических объектов к КВЧ излучению равен 10 мкВт/см^2 . Для животных этот порог составляет единицы милливатт на квадратный сантиметр (10 мВт/см^2). В качестве излучателей используют рупоры с различной апертурой – от 1 до 36 см^2 . Сведения о воздействии стационарного электромагнитного поля приведены в [101]. В основном гипотеза о воздействии низкочастотного (НЧ) поля на живые организмы сводится к улучшению кровоснабжения органов.

Таблица 1.18

Гипотезы о биологическом воздействии ИК и лазерного излучения

| Биологическое воздействие | Преимущества использования ИК и лазерного излучения |
|--|---|
| 1. Окислительное фосфорилирование и индукция фотосинтеза | Ускоряются рост и регенерация тканей, энергетическая перестройка внутри молекулярных комплексов |
| 2. Сильная поглощающая способность | Поглощение энергии излучения лазера выражено в крови и васкулитизированных органах |
| 3. "Прямая энергетическая подкачка" за счёт перераспределения биоплазмы | Стимулирующее действие на организм |
| 4. Селективный катализ метаболических реакций | Накопление энергии в клетках за счёт активации цитохромов митохондрий |
| 5. Поглощение излучения красного света порфинами, снижение резистентности старых эритроцитов и их распад | Активация деятельности эндокринных желез, прежде всего гипофиза и щитовидной железы |
| 6. Поглощение излучения красного света системой фоторегуляции у живых организмов | Повышение активности катализа в растворах, суспензии митохондрий и гомогенатах печени, повышение энергизации клеток |
| 7. Поглощение излучения лазеров на красителях оксигемоглобином | Коагуляция ненужных микрососудов кожи, лечение ангиомы, телеангиэктазии |
| 8. Узкофокусное ультрафиолетовое облучение эритемными дозами | Пролонгированное действие при бронхиальной астме и аллергических состояниях |
| 9. Эффекты биостимуляции | Активация важнейших ферментов организма, а также биоэнергетических и биосинтетических процессов |

Таким образом, можно сделать вывод о том, что проблема воздействия ЭМВ колебаний на биологическом уровне у живых организмов требует дальнейшего исследования.

В литературных источниках весьма мало сведений о совместных воздействиях ЭМВ излучений, в частности, не обнаружено ссылок на одновременное использование источников ИК, КВЧ, НЧ колебаний.

На наш взгляд, при ряде заболеваний у животных и людей, совместное использование источников ИК, КВЧ и НЧ колебаний, с точки зрения биологического воздействия, является весьма эффективным методом. Обобщая все сведения, можно утверждать следующее: ИК излучения поглощаются тканями и через них кровью в живом организме, для КВЧ излучения наиболее выраженные биологические эффекты объясняются резонансной структурой поглощения излучения клетками организма, а НЧ стационарные электромагнитные поля, проникая на достаточную глубину, обуславливают также специфический терапевтический эффект.

Таблица 1.19

Биологические эффекты миллиметровых волн

| Живые организмы | Длина волны КВЧ, мм | Описание биологического эффекта |
|-----------------|-------------------------------------|---|
| 1. Мыши | 7,07 – 7,27 | Защита костномозгового крове-творения от химиотерапевтических препаратов |
| 2. Крысы | 5,6 | Энергостимулирующее воздействие |
| 3. Животные | 4,15 – 4,23 | Увеличение скорости заживления ран на кожной поверхности, снижение метастазирования |
| | 5,6; 7,1 | Увеличение скорости заживления ран на кожной поверхности, снижение метастазирования |
| 4. Человек | 6,5; 8,1 5,6; 7,1 4,88 – 5,17 | Лечение гнойных ран Выраженный лечебный эффект при лечении ряда заболеваний |

Современный уровень представлений о природе феноменального поведения клеток при воздействии комплексного спектра позволяет предполагать о его взаимодействии с колебаниями на мембранах митохондрий, являющихся энергетическими источниками внутри клетки.

1.4.2.2. Воздействие электромагнитных излучений на биологические функции животных

Исследования воздействия электромагнитного излучения на биологические функции животных проводилось на различном материале, включая представителей птиц и млекопитающих.

Образцы волос, взятые с различных участков тела лошадей различной масти, характеризуются специфическими кривыми зависимости пропускания от интенсивности белого света и спектрального состава света. Эти кривые наряду с параметрами дифракционных картин и флуоресцентными характеристиками волос могут служить критериями для оценки качественных признаков лошадей [102].

Предынкубационное облучение утиных яиц лучами гелиево-неонового лазера улучшает постэмбрионное развитие и естественную резистентность птиц [103]. Иммунобиологические показатели естественной резистентности у утят опытных групп находились на довольно высоком уровне 30 и 56 дней. Количество лизоцима в опытной группе соответственно равнялось 4,7 и 3,7 мкг/мл, а в контрольной – 4,4 и 3,2 мкг/мл, бактерицидная активность составляла в опытной группе – 38 и 54%, а в контроле – 37 и 51%. К концу откорма живая масса подопытных утят превышала контроль на 5,6%. О более интенсивном обмене веществ в опытных группах свидетельствуют также данные о развитии внутренних органов. Таким образом, действие низкочастотного лазера не ограничивается только облучаемым участком, а вызывает ответную реакцию сердечно-сосудистой, нервной, гормональной и других систем организма.

Развитие цыплят при воздействии на инкубационные яйца лазерным излучением исследовано на основе гелиево-неонового лазера ЛГ-78 при времени воздействия 0,04 с [104]. Материалом служили цыплята кросса “Тетра-В”, которых выращивали в плёночных батареях КВМ-36. Инкубацию осуществляли в инкубаторе “Универсал-55”. Условия содержания и кормления соответствовали существующим требованиям. По принципу аналогов сформировали две группы цыплят по 1000 голов: контрольную (яйца не облучали) и опытную. Сохранность цыплят в опытной группе была выше на 4,2%, живая масса – на 248 г. При убое масса полупотрошенной тушки у подопытных цыплят составила 1085 г и была на 135 г (11,5%) больше, чем в контрольной группе: выход тушек был выше в опыте на 20,7%.

Предварительными исследованиями [105] выявлено положительное влияние лазерного облучения на инкубационные качества, эмбриональную жизнеспособность и выводимость цыплят по результатам инкубации яиц, полученных при использовании петухов двух линий: с низкой и высокой оплодотворяющей способностью.

Квантовая (ультрафиолетовое облучение крови, лазер CO₂) магнитотерапия является экологически чистым стимулятором неспецифической иммунной системы [106]. Разработана методика облучения ультрафиолетовыми лучами ауто- и

гетерогенной крови, которую применяют как эффективное средство для стимуляции организма животных и лечения многих хирургических болезней. Применение углекислого лазера позволяет улучшить лечение гнойных заболеваний мягких тканей, инфицированной основы кожи копытных и овец. Эффективные результаты применения магнитных полей получены при различных травмах (ушибы, раны, растяжения, подвывихи, переломы костей), при экспериментальных химических раздражениях, конъюнктивитах, острых воспалительных процессах.

Разработанный метод аутотрансфузии ультрафиолетом облученной крови (АУФОК) [107] был положен в основу попытки разработки препарата профилактического действия, исключающего необходимость фиксации животных. Исходным материалом препарата служила кровь молодых здоровых быков, которую подвергают дозированному облучению короткими УФ лучами в специальном приборе. Непосредственно для приготовления препарата использовали смыв с облученной лейкоцитарно-эритроцитарной массы.

Препарат применяли на фермах в дозе 5 мл с повторным введением через сутки. Обработано 369 телят. Эффективность действия препарата оценивали по общему состоянию животных. Своевременное применение препарата (в первые 3 дня после рождения) мобилизует защитные силы организма, снижает процент заболеваемости, облегчает протекание болезни, уменьшает сроки выздоровления.

Телят в возрасте 1 месяца ежедневно подвергали комбинированному воздействию УФ и ИК облучений и аэроионизации, что обусловило к 3-х месячному возрасту развитие системы защитных гуморальных и клеточных механизмов у подопытных телят [108]. Фагоцитарная активность нейтрофилов повысилась за 2 месяца облучения в 1,25 раза. Профилактическая эффективность применения УФ и ИК облучений и аэроионизации составила 90%.

Метод аутотрансфузии УФ облученной крови (АУФОК) отрабатывали на бычках [109]. Установлены фаза переливаемой крови, продолжительность и интенсивность её облучения, а также интервал между инфузиями. На клинически больных коровах получен положительный терапевтический эффект от применения АУФОК при лечении травм, миозитов, миопатоза, мышечного ревматизма, ламинитов и других заболеваний, в основе которых лежат острое и подострое воспаления.

Биохимические механизмы влияния спектральных характеристик света на физиологическое состояние коров в период раздоя изучены в [110]. В опыте использовались три группы (по 10 голов) животных-аналогов. Источником света служили лампы ДРА-125, ДРИ-175 и ДНаТ-150. Интенсивность освещения – 150 лк. Материалом для исследований служила кровь, полученная на 1, 7, 15, 30-й день опыта. В крови коров отмечалось резкое повышение содержания мапонового диальдегида и диеновых конъюнктов. Выявлены определённые закономерности влияния спектра освещения на активность креатинкиназы и ферментов переаминирования аминокислот в плазме крови коров.

Повышение молочной продуктивности у крупного рогатого скота вызывает деминерализацию костей, что ведёт к разбалансированию гомеостаза [111]. Для профилактики заболеваний костей обменного характера применяют УФ облучения. Установлено положительное влияние УФ облучения на состояние костной ткани.

Теоретическое исследование явление вращения клеток во внешнем электрическом поле для случая клеток сложной формы показало, что мембрана клетки состоит из нескольких слоев, различающихся электрическими характеристиками, а все границы раздела представляют собой софокусные вытянутые или сплюснутые эллипсоиды вращения [112]. Показано, что даже для достаточно сильно деформированных клеток их скорость вращения с точностью до нескольких десятков процентов совпадает со скоростью вращения шарообразной клетки того же объема.

Установлена связь [113] частоты α -ритмов мозга человека и частоты инфразвуковых колебаний, возникающих при вспенивании и откатывании волн на поверхности морей и океанов. На этом основании предложены рекомендации по воздействию на человека инфразвуковых колебаний умеренной интенсивности для поддержания состояния его бодрствования.

Физические процессы, происходящие в клетках живых организмов при КВЧ воздействиях, методы создания и использования когерентных и КВЧ терапевтических установок описываются в [114].

В Кембридже 1–5 июля 1991 г состоялся симпозиум по теории исследования электромагнитных явлений [115]. Было показано, что применение методов конечных элементов и конечных разностей во временной области даёт хорошие результаты при численном моделировании взаимодействия электромагнитных волн со сложными неоднородными трёхмерными объектами, например с человеческим телом. Рассмотрено моделирование диагностического оборудования и аппаратуры теплоэлектролечения с высокой проникающей способностью излучения на внутренние органы человека. Подчёркивается, что метод конечных разностей практически идеально приспособлен к организации параллельных вычислений, что позволяет существенно сократить вычислительные затраты при моделировании.

Объектом исследования оценки электромагнитных полей (ЭМП) УВЧ [116] служили электрофизические показатели организма лактирующих коров: частота сердечных сокращений (ЧСС), частота дыхания (ЧД), кожно-гальванический рефлекс (КГР), регистрируемые в процессе машинного доения без воздействия и при воздействии ЭМП УВЧ. Получены достоверные изменения показателей электрофизиологического статуса коров. Суммарная активность КГР достоверно отражает изменения тонуса нервной вегетативной системы. Действие ЭМП УВЧ не вызывает достоверного увеличения ЧСС, наблюдаемого при обычном методе доения, т.е. снимает нагрузку от машинного доения на сердечно-сосудистую систему коров.

Лечебный переносной доильный аппарат ЛПДА-2УВЧ эффективен в лечении коров при мастите [117]. Его используют в процессе машинного доения без применения лекарств. Результаты лечения коров при мастите с помощью аппарата ЛПДА-2УВЧ и антибиотиками одинаковы, разница статически недостоверна. Применение электрического поля УВЧ наиболее эффективно при лечении скрытого мастита. Наиболее оптимальный режим работы аппарата ЛПДА-2УВЧ при лечении коров, больных маститом, – 20 Вт в течение 5 мин.

Развита тепловая модель [118] разогрева биоткани при воздействии электромагнитного излучения. Задача решается методом конечных элементов. Изменение кровотока во времени определяется температурной зависимостью вязкости. Проведены численные расчёты модельной задачи и определено влияние кровотока на изменение температурного поля во времени.

Литературные данные об общих закономерностях взаимодействия слабоинтенсивного электромагнитного излучения КВЧ диапазона с биологическими системами различного уровня организации обсуждают возможность использования энергетического подхода в качестве методологии при изучении физических механизмов этих процессов [119].

Зависимость светорассеяния в воде, водных растворах гемоглобина и ДНК от температуры, механического возмущения и от магнитного поля (МП) колебаний приведена в [120]. Показано, что повышение температуры вызывает снижение амплитуды низкочастотных и повышение амплитуды более высокочастотных колебаний; механическое перемешивание устраняет низкочастотные колебания, время их восстановления занимает более 10 ч. Установлено, что при наложении постоянного МП более 240 А/м появляются регулярные колебания, после снятия поля колебания (с увеличивающимся периодом) сохраняются в течение многих часов. Полагают, что в основе механизма возникновения длиннопериодических колебаний светорассеяния лежит установление дальней коррелированности вращательных трансляционных колебаний молекул за счёт сил дальнего действия и внешних полей.

В опытах на взрослых кошках выявлено выраженное воздействие СВЧ облучения на электрогенез спинного мозга при плотности потока волн 15 мВт/см^2 при времени воздействия 10 мин. Оценка изменений соматосенсорных потенциалов мозга показала наличие фазы угнетения ответов на 20% с максимумом эффекта через 2–3 ч после облучения. В дальнейшем происходило экспоненциальное восстановление характеристик потенциалов и после 30 часов они соответствовали контрольным цифрам [121]. Приводятся доказательства в пользу того, что наиболее уязвимым звеном при воздействии волн СВЧ могут являться синаптические контакты нейронов в рефлекторной дуге.

1.4.2.3. Воздействие электромагнитных полей на растения

Для оценки состояния растительных объектов применяются тепловые, поляризационные и угловые характеристики излучения [122].

В Великобритании сконструирован семиканальный радиометр MSP-1000, предназначенный для применения КСЯ посевов в спектральном диапазоне 0,675–2,35 мкм [123]. По данным измерения КСЯ в посеве пшеницы рассчитываются нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI), трансформированный вегетационный индекс (TVI) и четырехразмерная зеленость (4DG).

Обработка семян масляничных (подсолнечника и горчицы) в электромагнитном поле в течение 6-12 мин оказывает положительное влияние на рост проростков. Обработка почвы перед посевом в магнитном поле даёт такой же эффект, как полив активированной водой [124].

УФ облучение сельскохозяйственных растений в ранний период способствует получению достаточно высокой прибавки в их урожае, что видимо, обусловлено, активными стимуляционными процессами, происходящими в молодых органах, тканях и клетках под воздействием малых доз УФ радиации [125].

Опубликованы экспериментальные данные об эффективном влиянии неионизирующих излучений нетеплового уровня мощности на функционирование живых организмов [126]. Выявлены некоторые особенности воздействия данных полей и их биотронных параметров на биологические объекты. Высокая действенность ЭМ излучения на живые организмы в значительной степени определяется когерентностью излучения. Одним из основных условий когерентности излучения является упорядоченность поляризованной пространственности временной структуры (ППВС) ЭМП. В целях выявления характерной зависимости всхожести семян растений от ППВС ЭМП были проведены эксперименты по воздействию лево-, право- и линейнополяризованных амплитудно-манипулированных (АМ) полей на семена сорняка щедиплина зелёного и культур: ячменя, пшеницы, овса, турнепса. Отдельные предположения полностью подтвердились.

Таким образом, характер ППВС ЭМП является эффективным регулятором всхожести семян и при обработке ЭМП увеличивается на 40%.

Результаты исследований предпосевной обработки различных семян позволили выбрать технологическую схему подготовки предпосевого материала, основу которой составляет предварительная обработка семян градиентным магнитным полем и лазерным излучением [127]. Были определены основные параметры воздействия. Оптимальная напряженность МП составила для зерновых 7,0–8,5 кА/м, для картофеля – 0,8–1,8 кА/м.

Длина волны лазерного излучения 633 нм, экспозиция 0,15–0,9 Дж/м². По результатам исследований в ЧНИИМЭСХ нечерноземной зоны СССР был разработан и изготовлен экспериментальный образец магнитолазерной установки МУЛ-1, который прошел широкую производственную проверку на опытных участках и хозяйствах Республики Беларусь.

Лазерный свет ($\alpha=632,8$ нм) применяли для повседневной фотоактивации семян огурца [128]. Исследовались всхожесть семян и некоторые параметры семян,

выращенных из 7-ми дневных проростков. Выявлено, что лазерная обработка повышает всхожесть семян. Под действием лазера увеличивается сырая масса семядольных листьев проростка, а содержание в них хлорофилла в расчете на единицу массы не изменяется. Сделано заключение о том, что сырая масса семядольных листьев может использоваться в качестве показателя лазерной фотоактивности семян этой овощной культуры уже в ранних этапах ортогенеза.

Процессы интенсификации в растениеводстве, хлопководстве используют эффекты сильных электрических полей [129]. Приведены результаты исследований применения электрических полей для интенсификации сушки мякоти дыни, электроимпульсной обработки продуктов перед сушкой, по использованию импульсных полей для электроискровой обработки корневищ многолетних сорняков, а также обеззараживания хлопчатника, зараженного вилтом.

Данные исследования, проведенные в поле, показывают ярко выраженную зависимость развития семян от информационных параметров излучения. Эффект обработки определяется не энергетическими характеристиками процесса, а биотропными параметрами ЭМП и обладает более сильным стимулирующим воздействием, чем немодулированное поле теплового уровня мощности при снижении энергозатрат на 3-4 порядка [130].

Установлены зависимости всхожести семян от величины биотропных параметров (длительности импульса, импульсной плотности, потока мощности экспозиции), имеющих резонансный или резонансноподобный характер. Выявлено, что эффект предпосевной обработки семян определяется в основном спектральными и поляризованными характеристиками ЭМП.

Проращивание в контролируемых условиях [131] проводится путем замачивания семян культуры в течение 30 ч в темноте, затем их помещали для проращивания в сосуды с 0,4% раствором агара. Проращивание осуществляли при температуре 22 °С в темноте. В начале прорастания семян воздействовали в одном из вариантов на них магнитным полем (5 кГс), а в контроле показатель магнитного поля равнялся 0,01 кГс. Отмечается, что при воздействии магнитного поля на прорастающие семена увеличивался рост корней проростков на 15-17% в сравнении с контрольным.

Исследование равночувствительных семян разных сортов ячменя по росту каллусных культур показало, что эта чувствительность может различаться в семь раз. Все галозерные сорта ячменя были более чувствительны к гамма-лучам по сравнению с пленчатыми сортами [132]. Установлено, что ген *rs*, локализованный в хромосоме 1 и контролирующей радиочувствительность, оказывает большое влияние на радиочувствительность семян, определяемую по росту каллусов. Каллусы оказались гораздо более чувствительными к облучению гамма-лучами по сравнению с семенами. Для большинства галозерных сортов дозы от 3 до 7 кР на 50% угнетали рост каллусных культур. Различия в радиочувствительности каллусов во многом определялись генотипом экспланты. Однако при облучении каллусов

различия в радиочувствительности были не столь велики, как при облучении семян. Обсуждаются механизмы устойчивости клеток и тканей гамма-облучений.

Целью исследования в [133] являлось изучение возможностей применения метода регистрации интенсивности влагопоглощения прорастающих семян для диагностики посевных качеств применительно к поиску воздействующих биотронных параметров при предпосевной обработке семян электромагнитным полем. Представлены результаты лабораторных опытов. Обработка ЭПМ семян озимой пшеницы сорта Ахтыргана положительно влияла на процессы набухания, наклёвывания и энергию прорастания. Показатель интенсивности влагопоглощения прорастающих семян достоверно отражает их посевные качества. Наибольшая информативность этого показателя обеспечивается при времени намачивания 6-16 ч. Применение показателя интенсивности влагопоглощения целесообразно при исследовании специфических физических воздействий на семена при предпосевной работе.

Отмечено, что определение наиболее эффективных параметров лазерного излучения дало возможность установить выраженное модифицирующее действие на частоту индукции ионизирующей радиации наследственно изменённых форм пшеницы и ячменя. В опытах с использованием ячменя было установлено, что последующая обработка гамма-облученных семян светом гелиево-кадмиевого лазера с длиной волны в синей области спектра повышала выход изменённых форм в M_2 по сравнению с облучением только гамма-радиацией с 4,9 до 20,3%. Противоположный эффект получен при использовании гелиево-неонового лазера. Дополнительное воздействие на гамма-облучённые семена пшеницы проводилось светом с длиной волны в красной области спектра. Метод комбинированного воздействия ионизирующей радиацией и лазерным светом на семена зерновых культур повышал эффективность экспериментального мутагенеза [134].

Разработаны методы получения информации о состоянии сельскохозяйственных культур при воздействии на них электромагнитных полей и использовании автоматизированной системы поиска биотронных параметров. Обсуждается проблема информативности физико-химических изменений в биологических объектах. Рассмотрены методы регистрации отклика на воздействие в зависимости от уровня организации биологического объекта (субклеточные структуры и т. д.). Представлены результаты получения информации по изменениям температуры, степени проницаемости биомембран, скорости изменения содержания углекислого газа на примере сельскохозяйственных культур [135].

Влияние излучения на растения изучали путём применения ламп, существенно различающихся спектральным распределением энергии [136]. Опыты проводили в подземном помещении без доступа естественного света, где были размещены облучательные установки. Продолжительность светового периода составила 18 ч при температуре 16-20⁰С. В качестве исходного материала использовали сорта яровой пшеницы Ершовская, Кутулуцкая, Жница, Саратовская 46, Линия 8592 и сорта ячменя Донецкий 8, Дворан, Олимпиец. Рост и

продуктивность яровой пшеницы и ячменя изменялись в зависимости от условий выращивания. Под лампами ДНаТ-400 вегетационный период был короче, а продуктивность выше. При одинаковой удельной установленной электрической мощности под лампами ДНаТ-400 без естественного освещения увеличивались высота растений, длина колоса и число колосков, количество зёрен – в 2 раза, а масса зёрен – в 4 раза по сравнению с растениями, выросшими под лампами ДРЛФ-400. Оптическое излучение натриевых ламп типа ДНаТ-400 положительно влияло на рост и развитие растений; как дополнительное к естественному свету следует использовать управляющее действие оптического излучения для моделирования светового дня. В теплицах не следует применять облучательные установки с удельной электрической мощностью более 1 кВт/м^2 и интенсивностью искусственного освещения более 25 клк.

На основании спектрометрических данных показано влияние различных источников излучения, в том числе солнечного света, освещения лампами дневного света, красного, синего и дальнего красного света на величину таких параметров интенсивности фотосинтеза, как активная фотосинтетическая радиация (ФАР), относительный квантовый выход, поток фотонов (ПФ) и спектральное распределение фотонов, а также на фоторавновесие фитохрома и относительную скорость взаимопревращения пигментов фитохрома P_{660} и P_{730} (ОСВФ) и растительных объектов [137]. Установлено, что при величине излучения, равной $36,5\text{--}42,0 \text{ Вт/м}^2$, величина ФАР на солнечном свете (контроль) составляла $146,4 \text{ мкмоль/м}^2$ в 1 с и была заметно ниже величины ФАР при освещении растений дневным, красным и синим светом, которая составляла $191,1\text{--}199,3 \text{ мкмоль/м}^2$ в 1 с и превышала величину ФАР при освещении растений дальним красным светом, которая достигала только $57,5 \text{ мкмоль/м}^2$ в 1 с. В то же время показано, что величина ПФ была почти на одном и том же уровне при освещении дневным и красным светом (составляла $163,8\text{--}181,4 \text{ мкмоль/м}^2$ в 1 с), заметно ниже ($147,7 \text{ мкмоль/м}^2$ в 1 с) при освещении растений дальним красным светом. Отмечали, что ОСВФ была наивысшей на красном свете и наиболее низкой при освещении растений синим светом.

Опыты по исследованию смещения изоэлектрической точки (ИЭТ) цитоплазматических белков под действием градиентных магнитных полей невысокой индукции (до 40 МТ) проводили на корешках проростков риса и ячменя. Результаты показали, что в подавляющем большинстве случаев наблюдалось смещение ИЭТ в щёлочную или кислую сторону, что в первом случае означало увеличение отрицательно заряжённых групп белков. При действии поля с частотой 6 Гц, индукцией 40 МТ в течение 5 с наблюдалось смещение ИЭТ в кислую среду. Был сделан вывод, что есть все основания рассматривать клеточные белки (мембранные и цитоплазматические) как структуру, непосредственно участвующую в формировании ответной реакции растительной клетки на действие магнитного поля [138].

С целью уточнения количественных характеристик степени отзывчивости семян зерновых культур на предпосевную обработку в градиентном магнитном поле провели лабораторные и полевые исследования с семенами 1-го и 2-го классов посевного стандарта сортов овса Кубанский и Луговский 1021 и 3 сортов ячменя Одесский 82, Одесский 100 и Дружба. Предпосевная обработка семян овса и ячменя в градиентном магнитном поле увеличивала темп и синхронизацию прорастания, повышала долю более развитых растений [139]. Положительное влияние такой предпосевной обработки проявилось не только на начальных этапах развития растений, но и сохранялось вплоть до уборки урожая. Технологичность и высокая производительность установок для предпосевной обработки семян в градиентном магнитном поле делают этот агротехнический приём перспективным для использования его в качестве выведения семян из состояния покоя, формирования посевов, более дружного созревания растений и повышения урожая зерновых культур.

Межродовые комбинации $F_1 - Fe$, полученные после обработки гамма-лучами (доза 100 Гц) семян F_0 гибридов от сортов Прогресс, Богарная 56, Мироновская 808 с эгилопсом, обладали смешанными признаками [140]. При этом колосья остистых и безостых форм рекомбинантов имели типичный вид, а по плотности расположения колосков были похожи на колосья эгилопса. Мутанты и рекомбинанты F_1-F_6 гибридов тритикале с пшеницей также отличались ценными признаками. Практический интерес представляют формы пшеничного типа, но характеризующиеся высокой зимостойкостью. Рекомбинанты, выделенные от гибридов F_2 (пшеница + эгилопс), отличались лучшей зимостойкостью и высокой продуктивностью колоса. Зерно у 11 таких рекомбинантов отличалось высоким хлебопекарным качеством.

Для получения родительских форм использовали яровой ячмень сортов Северный и Рассвет, пыльца которого была предварительно обработана лазерным лучом перед опылением. Контролем служили гибридные растения, полученные опылением необлучённой пылью, а также родительские формы. Завязываемость семян при гибридизации с использованием лазерного облучения значительно возрастала. При плотности лазерного излучения 20 мВт/см^2 , длине волны $632,8 \text{ нм}$ в течение от 1 до 10 мин при облучении перед скрещиванием наблюдали увеличение скрещиваемости семян. С увеличением экспозиции до 30 мин был обратный эффект. При использовании лазерного облучения пылью перед скрещиванием можно регулировать темпы получения гибридов и при необходимости ускорять эти процессы. При воздействии на пыльцу ярового ячменя лазерным излучением в непрерывном режиме получали высокий выход изменённых форм. Частота и спектр полученных изменённых форм зависели от параметров облучения, а также от генотипа и физиологического состояния объекта [141].

Повреждения хромосом в корешках ячменя и скерды, ДНК-диметров тимика индуцируются коротковолновым УФ светом [142]. Дозы $460-1500 \text{ Дж/м}^2$ индуцировали 3-15% клеток с повреждениями хромосом, максимум которых был в

клетках, облучённых на фазе С клеточного цикла. В тетраплоидных клетках скерды обнаружены одиночные хроматидные концевые делеции, возникшие во 2-м после облучения цикле. Отмечена взаимосвязь между УФ индукцией повреждений ДНК и хромосомными повреждениями в интервале доз 400-1500 Дж/см². Фотореактивирующий свет сразу после УФ облучения на 50% уменьшил количество повреждений хромосом в клетках ячменя, облучённых на фазе С клеточного цикла. После облучения дозой 220 Дж/м² протопластов табака в отсутствие репликации обнаружено включение Н³-тимика в ДНК, что указывает на возможность репаративного синтеза ДНК.

В течение 1978–1984 гг. проводили испытания [143] установки “Львов-1. Электроника” с гелиево-неоновыми лазерами разной мощности на зерновых культурах. Установлены оптимальные варианты облучения зерновых культур в условиях Львовской области и других областей западных районов Украины, отличающихся относительно невысокой суммарной естественной облучённостью в период вегетации растений. Опыты и лабораторные испытания показали, что применение лазерных установок эффективно влияет на повышение урожайности зерновых культур. Установлена отзывчивость зерновых культур на гелиево-неоновый лазер. Определены сроки отлежки семян, их облучения лучом лазера – озимые зерновые лучше высевать сразу после облучения, а яровые – после определённой отлежки (10-15 дней после облучения). Отмечается некоторое сохранение эффекта облучения в семенах нового поколения, который со временем затухает.

Вопросы методологии и стандартизации методики электрофизиологических исследований являются важными при проведении исследований и разработке технологии [144]. Разработанный комплекс аппаратуры для электрофизиологических исследований позволил получить качественно новую информацию о процессах жизнедеятельности растений. Одновременная регистрация разности биопотенциалов, потенциалов действия и ВАХ является важным достижением, тем более что измерения производятся при минимальном воздействии на объект. Такой способ измерения электрических характеристик растения на постоянном токе даёт возможность также оценить порог возбудимости и поляризуемости живой ткани, которые являются важнейшими характеристиками живой растительной ткани.

1.4.2.4. Гипотеза о воздействии электромагнитной волновой терапии (Т-терапии)

Первоначальное изучение воздействия Т-терапии началось при лечении мастита у коров. Проблема мастита у сельскохозяйственных животных до настоящего времени сложна и актуальна. Несмотря на постоянное совершенствование техники механического доения, разработку новых методов диагностики, терапии и профилактики данного заболевания, мастит продолжает оставаться широко распространённым заболеванием.

Особенно значительное распространение в последнее десятилетие получил мастит без выраженных клинических симптомов заболевания, т.е. протекающий в скрытой форме. Так, по данным Международной молочной федерации, клинически выраженным маститом болеют в среднем около 3%, а скрытым – до 52% коров.

Мастит без выраженных клинических признаков заболевания при несвоевременной диагностике и без лечения может протекать очень длительно – в течение нескольких недель. Молоко, полученное от коров, больных скрытым маститом, попав в общий удой, может вызвать различные заболевания у людей, а также привести к нарушению технологических процессов его переработки на молокоперерабатывающих предприятиях.

Учитывая вышеизложенное, перед нами была поставлена задача: используя лабораторные методы, провести изучение качества секрета молочной железы при лечении больных маститом коров, используя безлекарственный метод с помощью электромагнитного волнового воздействия (Т-терапии).

Исследования были проведены на базе учхоза БСХА в лаборатории микробиологии кафедры физиологии, биотехнологии и ветеринарии, лаборатории биотехнологии молочного скотоводства опытной станции БСХА.

Предварительно все животные комплекса были исследованы на заболевание молочной железы с помощью различных методов. Лабораторный анализ содержимого молочной железы позволил установить, что из 340 исследованных проб положительную реакцию показали 17, сомнительную – 83, т. е. соответственно 5% и 27,35% от общего числа исследованных проб молока. Наиболее эффективным методом диагностики скрытого мастита является подсчет соматических клеток в содержимом молочной железы [145].

Больными скрытым маститом считали коров, пробы молока которых давали положительные или сомнительные результаты при исследовании различными методами в сравнительном аспекте.

Для лечения коров, больных клиническим и скрытым маститом, использовали устройства, разработанные сотрудниками БГУИР [146]. Обработку молочной железы проводили в утренние и вечерние часы суток ежедневно в течение 3 дней. Пробы содержимого молочной железы брали до сеанса лечения животных, а затем через 5-10 мин до и после каждого сеанса.

Полученные результаты были обработаны с помощью методов статистического и корреляционного анализа. За животными продолжали вести наблюдения и по установленной схеме проводили их клиническое обследование и лабораторный анализ молока.

При микробиологическом исследовании секрета молочной железы коров, больных скрытой формой мастита, было установлено, что от общего количества микроорганизмов 17–37% составляют шаровидной формы, преимущественно стрептококки и диплококки, 3–42% – стафилококки и 58–80% – палочковидные формы – молочнокислые микроорганизмы, кишечная палочка; в секрете молочной железы коров, больных клинической формой мастита, кроме перечисленных

микроорганизмов были обнаружены повышенное содержание стафилококков и наличие гнилостной микрофлоры.

После первой обработки молочной железы в содержимом снизилось содержание грамм-отрицательных форм микроорганизмов на 24–38%, стрептококков – на 9–23%, стафилококков на – 11–18% по отношению к исходному уровню. В последующем прослеживалась устойчивая тенденция к снижению концентрации микроорганизмов и на 3-е сутки в содержимом молочной железы обнаруживались единичные грамм-положительные палочковидные и шаровидные формы микроорганизмов.

Следовательно, обработка молочной железы с помощью предлагаемого устройства положительно сказывается на микробиологическом составе секрета больных маститом коров и в течение непродолжительного срока способствует его нормализации. По микробному составу секрет молочной железы больных маститом коров на 4-е сутки соответствует молоку хорошего качества.

При изучении морфологического состава содержимого молочной железы установлено, что у клинически больных маститом коров содержание соматических клеток составляет в среднем 2081711 ± 166805 в 1 см^3 , у сомнительно реагирующих на диагностическую пробу животных содержание соматических клеток – $770881 \pm 23338 \dots 1278881 \pm 23338$. После первой обработки количество клеток уменьшилось соответственно на 27,8%, 32,1% и на 33,4%. Максимальное снижение числа соматических клеток наблюдали после повторной обработки молочной железы, т.е. через 1–1,5 суток с момента начала опыта. Содержание клеток в содержимом молочной железы у обработанных животных составляло в среднем $297806 \pm 3200 \dots 342527 \pm 6011$ в 1 см^3 .

При изучении кислотности молока установлено, что в группе больных животных данный показатель составил в среднем $24,6^{\circ}\text{T}$, после первой обработки абсолютная величина данного показателя практически не изменилась, а у некоторых животных увеличилась на $0,2–0,5^{\circ}\text{T}$. Устойчивое снижение кислотности наблюдали только после третьей обработки молочной железы. Кислотность секрета молочной железы снижалась на $3,5^{\circ}\text{T}$ и составляла в среднем $20,1 \pm 0,01^{\circ}\text{T}$. При изучении концентрации лактозы установлено, что у коров, больных эндометритом, данный показатель колеблется от 4,3 до 5,88% с последующим снижением к концу первых суток до 3,82% и незначительным повышением (до 4,1%) к концу третьих суток с момента начала опыта.

Механизм воздействия Т-терапии может быть понят из гипотез, построенных на основе достижений современной радиобиологии и радиофизики [147]. Совокупное воздействие электромагнитных волн инфракрасного диапазона, крайне высоких частот и низких частот, составляющее Т-воздействие, приводит к активизации защитных сил организма. Установлено, что больные клетки излучают акустоэлектрические колебания [148], которые на поверхности тела ослабляются до 10^{12} раз.

Главенствующую роль в процессе выздоровления играет синхронизация внешними источниками колебаний в белковых структурах на мембранах больной клетки. С позиции иммунологии Т-терапия также активизирует защитные силы организма. На поверхности лимфоцитов находятся МНС молекулы, резонансные частоты которых лежат в КВЧ диапазоне. Поэтому при внешних КВЧ воздействиях на определённых частотах активизированные лимфоциты интенсивно уничтожают чужеродные антигены.

Гипотеза интенсивного воздействия Т-терапии, с точки зрения радиофизики и радиобиологии, может быть построена на известном явлении параметрической “подкачки” колебаний. Соотношение частот ИК и КВЧ равно 40000. В этом случае, представляя путь распространения низких колебаний КВЧ по миелиновым оболочкам, можно полагать, что ослабление КВЧ частот на пути к больному органу будет минимальным и даже возможно усиление сигнала. Внешние НЧ колебания за счёт изменения магнитного момента белковых структур на поверхности клеточных мембран в сочетании с ИК и КВЧ частотами позволяют перекрыть достаточно широкий спектр колебаний белковых структур. При таком рассуждении непротиворечивой становится и гипотеза о реакции нейрогуморальной системы на раздражение биологически активных точек (БАТ) [149], известная в традиционной чжень-цзю-терапии и лазерной терапии.

После курса Т-терапии огрубление оснований сосков вымени, свойственное особенно передним соскам, при машинном доении исчезло. Молокоотдача увеличилась на 11–15%. Во время сеанса поведение коров спокойное, так как Т-терапия снимает болезненное ощущение.

Таким образом, предложенный метод лечения мастита у коров достаточно эффективен, не требует дорогостоящих лекарственных средств, не имеет противопоказаний, так как лечение происходит нетепловыми дозами. В условиях интенсивного развития молочного производства в Республике Беларусь необходимо проводить маститный мониторинг и Т-терапию выявленных заболеваний скрытым маститом.

Выдвинутая гипотеза о воздействии Т-терапии на процессы саморегуляции в клетках и подтверждённая при лечении мастита у коров позволила применить разработанный метод при направленном выращивании животных [150].

1.4.2.5. Качество секрета молочной железы и биохимического состава крови при лечении мастита у коров с помощью Т-терапии

На основе обобщения экспериментальных исследований, проведённых при лечении маститом коров с помощью предложенного прибора, была разработана методика исследований, получены качественная характеристика секрета молочной железы при лечении, динамика биохимических и морфологических показателей крови и гормональный профиль организма больных маститом коров.

Материалом для исследований служили секрет молочной железы и кровь здоровых и больных маститом коров. Перед началом опыта все животные были

исследованы на заболевание молочной железы с помощью бромтимоловых карточек, пробы с димастином и метода подсчёта соматических клеток в содержимом молочной железы. Больными клинической формой мастита считали коров, у которых при визуальном осмотре и пальпации отмечали нарушения конфигурации и консистенции тканей молочной железы, а также изменение цвета и консистенции секрета молочной железы. Больными скрытой формой мастита считали коров, пробы молока которых давали положительную или сомнительную реакцию при исследовании их различными методами в сравнительном аспекте.

Лечение больных животных проводили с помощью прибора, разработанного сотрудниками БГУИР (г. Минск). Обработку молочной железы проводили в утренние и вечерние часы суток в течение 3 дней. Пробы крови и содержимого молочной железы брали за 20–24 ч, 10–12 ч, 5–10 мин до начала опыта, а затем через 5–10 мин после каждого сеанса обработки животных. Заключительное исследование проводили через 3–7 дней после последней обработки молочной железы.

В секрете молочной железы определяли:

- 1) общую бактериальную загрязнённость;
- 2) кислотность;
- 3) содержание молочного сахара;
- 4) вид микроорганизмов;
- 5) культурные и биохимические свойства микроорганизмов;
- 6) содержимое соматических клеток.

В крови коров определяли содержание кальция, фосфора, каротина, общего белка, гемоглобина, эритроцитов, лейкоцитов, проводили подсчёт лейкоформулы. Лабораторные исследования крови и секрета молочной железы проводили по общепринятым методам.

Методом радиоиммунологического исследования определяли содержание в крови гормонов – экстрадиола, прогестерона, кэртизола, тироксина и трийодтиронина. По результатам клинического исследования подопытные животные были распределены на группы с учётом их физиологического состояния: 1-я группа (n=9) – здоровые животные; 2-я группа (n=8) – коровы, больные клинической формой мастита; 3-я группа (n=7) – коровы, больные скрытой формой мастита. В данные группы были включены небеременные животные с нормальным проявлением половой цикличности. В опытные группы вводили животных через 3–4 дня после овуляции фолликула из яичника.

В качестве контроля использовали группу больных маститом животных (n=7), которые не подвергались обработке предлагаемым разработчиком прибором. Для изучения качественной характеристики секрета молочной железы пробы секрета брали в стерильные пробирки согласно методики с каждой доли вымени больных маститом коров. Контролем служили пробы секрета из здоровых долей молочной железы коров.

При изучении широты распространения мастита среди животных установлено, что в зависимости от сезона года, условий содержания и эксплуатации

животных заболевание молочной железы наблюдается у 4,7–35,37% коров, причём наибольший процент поражения молочной железы регистрируется у животных после отела.

При микробиологическом исследовании секрета молочной железы коров, больных скрытой формой мастита, установлено, что среди общего количества микроорганизмов 14–42% составляют стрептококки и диплококки, 3–42% – стафилококки и 84–50% – палочковидные формы: молочнокислые организмы, кишечная палочка и др. При изучении микрофлоры секрета молочной железы коров, больных клинической формой мастита, установлено, что кроме перечисленных микроорганизмов в пробах секрета содержалось большое количество стафилококков и представителей гнилостной микрофлоры.

После первой обработки молочной железы коров, больных маститом, в пробах снизилось содержание стрептококков на 9–23%, стафилококков – на 7–18%, грамм-отрицательных форм микроорганизмов – на 22–54% по отношению к исходному уровню. В последующем прослеживалась устойчивая тенденция к снижению концентрации микроорганизмов, и через 3-е суток в секрете молочной железы содержались единичные грамм-положительные палочковидные и шаровидные формы микроорганизмов (молочнокислые бактерии, моно- и диплококки). По микробному составу секрет молочной железы обрабатываемых коров, болевших скрытой формой мастита, соответствовал молоку хорошего качества. Следовательно, обработка молочной железы коров, больных скрытой формой мастита, с помощью предлагаемого устройства положительно сказывается на качественном составе микроорганизмов и в течение 3–4 суток способствует нормализации функции железы и повышению качества секрета (молока).

Следует отметить также и то, что при микробиологическом исследовании секрета молочной железы, взятого от больных коров и обработанного однократно и двукратно в пробирках, роста микроорганизмов на специфических и питательных универсальных средах практически не наблюдалось.

При лечении коров, больных клинической формой мастита, наблюдали аналогичную динамику микробного состава секрета молочной железы, однако консистенция и цвет секрета восстанавливались только после дополнительного воздействия лекарственными препаратами. Вероятно, кратковременная обработка молочной железы является недостаточно эффективным приёмом для нормализации её функциональной активности. Дальнейшее наблюдение за животными позволяет предположить, что для коров, больных клинической формой мастита, целесообразно повторить курс лечения через 2–3 дня в том же режиме, поскольку, возможно, после первого курса обработки у животных наблюдаются восстановление функции клеток перенхимы и нормализация качественных характеристик секрета молочной железы. Однако данное предположение требует практического подтверждения.

При изучении морфологического состава содержимого молочной железы установлено, что у коров, больных клинической формой мастита, содержание

соматических клеток составляет в среднем 2684706 ± 166805 в 1 см^3 , сомнительно реагирующих на диагностическую пробу – 1048618 ± 29417 , а у здоровых коров – 300441 ± 3700 .

После первой обработки содержание соматических клеток в секрете молочной железы коров, больных клинической формой мастита, сократилось на 32,7%, у больных скрытой формой мастита – на 19,8% по отношению к исходному уровню. Максимальное снижение числа соматических клеток наблюдали после повторной обработки молочной железы, т. е. через 1–1,5 суток с момента начала опыта, которое составляло в среднем соответственно 5245527 ± 6003 и 297806 ± 3117 в см^3 . После 3–4 обработок содержание соматических клеток практически приравнивалось к абсолютной величине данного показателя в секрете молочной железы коров, отрицательно реагирующих на диагностическую пробу.

При изучении кислотности секрета молочной железы установлено, что в группе коров, больных маститом, данный показатель составлял в среднем $24,6^{\circ}\text{T}$. После первой обработки абсолютная величина данного показателя практически не изменилась, а у некоторых животных увеличилась на $0,2–0,5^{\circ}\text{T}$. Устойчивое снижение кислотности наблюдали только после 3-й обработки молочной железы. Кислотность секрета молочной железы снижалась на $3,5^{\circ}\text{T}$ и составляла в среднем $20,1–0,01^{\circ}\text{T}$.

При изучении концентрации лактозы в секрете молочной железы установлено, что у коров, больных маститом, данный показатель составлял в среднем $3,29–0,28\%$. После 1-й обработки содержание лактозы резко повышалось с последующей тенденцией к снижению и после 2-й обработки поддерживалось примерно на одном уровне с небольшими колебаниями, связанными с индивидуальными особенностями животных.

Для изучения биохимических и морфологических показателей крови больных маститом коров до начала опыта и в течение всего периода исследования пробы брали из яремной вены до обработки, и после обработки животных. Достоверная разница ($P < 0,01$) установлена только по содержанию лейкоцитов, а остальные показатели существенно не отличались (табл. 1.20).

Из табл. 1.20 видно, что абсолютные величины всех показателей, за исключением лейкоцитов, колебались в пределах физиологических значений.

При исследовании крови после обработки молочной железы коров с помощью предлагаемого разработчиком прибора содержание лейкоцитов снизилось до $7367,35$ тыс./мл. В результате расчёта парных коэффициентов корреляции установлено, что концентрация гемоглобина имеет обратную зависимость от содержания в крови лимфоцитов ($-0,508$) и среднюю степень зависимости ($0,519$) от наличия сегментоядерных элементов. Высокая степень корреляции ($-0,805$) установлена между содержанием лимфоцитов и сегментоядерных элементов. Среди биохимических показателей наблюдается средняя ($0,409–0,509$) степень связи между

содержанием в крови общего белка и фосфора, кальция и фосфора, каротина и эозинофилов.

Анализируя показатели с использованием эмпирического закона распределения, установлено, что у большинства животных максимальное значение содержания лейкоцитов до начала лечения составляло 9869,58 тыс./мл, после первой обработки – 9192,42 тыс./мл, после второй – 8515,125 тыс./мл, после третьей – 7838,08 тыс./мл.

Таблица 1.20

Статистическая характеристика показателей крови коров до лечения

| Показатель | Среднее значение | Среднее квадратическое отклонение | Коэффициент вариации | Средняя арифметическая ошибка | Средняя арифметическая достоверность |
|----------------------------|------------------|-----------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| Гемоглобин, г/% | 9,9 | 0,63 | 6,3 | | |
| Лейкоциты, тыс./шт | 9764,39 | 1620,21 | 20,8 | | |
| Эритроциты, млн | 6,79 | 1,02 | 14,9 | 0,12 | 80,83 |
| Лимфоциты, % | 70,2 | 4,86 | 6,9 | 200,08 | 36,82 |
| Палочкоядерные, % | 1,74 | 0,81 | 46,6 | 0,20 | 33,85 |
| Сегментоядерные, % | 21,24 | 4,84 | 22,8 | 0,97 | 72,28 |
| Эозинофилы, % | 5,32 | 2,72 | 51,1 | 0,17 | 10,3 |
| Общий белок, г/% | 6,22 | 0,41 | 6,5 | 0,97 | 21,94 |
| Каротин, мг/мл | 0,35 | 0,11 | 32,4 | 0,54 | 9,78 |
| Кальций, мг/% | 10,57 | 1,71 | 16,2 | 0,08 | 78,25 |
| Фосфор, мг/% | 5,88 | 0,68 | 11,6 | 0,02 | 14,48 |
| Резервная щёлочность, мг/% | 454,15 | 53,48 | 11,8 | 0,35 | 30,25 |
| | | | | 0,13 | 43,83 |
| | | | | 10,49 | 43,30 |

При изучении гормонального профиля организма коров, больных маститом, в период их лечения учитывали физиологическое состояние животных в стадии полового цикла. Пробы крови брали из яремной вены, полученную плазму хранили при температуре 18–20⁰С, исследования проводили по мере накопления достаточного количества проб плазмы крови (в среднем через 18–22 суток с момента начала опыта).

В результате исследования установлено, что в течение периода лечения коров при помощи предлагаемого прибора концентрация гормонов имела незначительные колебания, связанные с индивидуальными особенностями животных. Концентрация прогестерона до начала лечения составляла в среднем 0,93±0,08 нг/мл в течение не более 2 суток. Содержание эстрадиола в плазме крови составляло 0,02±0,08 мкг/мл и практически не изменялось в течение всего периода исследования. Концентрация кортизола имела тенденцию к увеличению после

воздействия на организм животных с помощью прибора, однако через 6–12 ч абсолютная величина данного показателя снижалась до исходного уровня с последующим увеличением после очередной обработки. Между изучаемыми показателями установлена слабая (0,001–0,346) степень корреляции.

Таким образом, обработка молочной железы больных маститом коров с помощью предложенного прибора способствует достаточно быстрому выздоровлению животных и не оказывает отрицательного воздействия на состав крови и функциональную активность эндокринных желез. Необходимы дальнейшие исследования при лечении коров, больных клинической формой мастита, путём увеличения количества сеансов обработки вымени прибором и дополнительного местного воздействия лекарственными препаратами. Высокая степень корреляции, установленная между содержанием лимфоцитов и сегментоядерных элементов при лечении больных маститом коров, указывает на справедливость выдвинутой [151] гипотезы параметрического воздействия Т-терапии. В этом направлении необходимо проведение дальнейших углубленных исследований по восстановлению гомеостаза животных.

1.4.3. Основные нормы допустимых уровней воздействия электромагнитных полей

Важным этапом в разработке, проектировании и подготовке мер по уменьшению вредного влияния электромагнитных полей является определение допустимых уровней и норм излучения. Нормирование ЭМП - это установление количественных и качественных характеристик ЭМП, потенциально вредных и опасных для здоровья человека. Критерии вредности и опасности могут быть различными. Так, в нашей стране за критерий вредности радиоволн приняты функциональные изменения (как правило, обратимые), а в США - морфологические. Поэтому различие в параметрах ЭМП, вызывающих те или иные функциональные и морфологические сдвиги, может составлять большую величину. В связи с этим выбор критерия опасности электромагнитного излучения является важным элементом нормирования. В настоящее время основными критериями нормирования ЭМП являются: появление выраженных реакций организма, снижение производительности труда и появление определенных обратных последствий электромагнитного облучения.

Во времена существования СССР был разработан комплект нормативной документации, который сейчас пересматривается в России, содержащий основные нормы предельно допустимых уровней излучений радиодиапазона, полей промышленной частоты, электростатического поля. На основе этих ГОСТов и основных международных стандартов (MPRII, Швеция) в нашей стране разрабатываются собственные нормативные документы. В настоящее время существует несколько документов, регламентирующих максимальные уровни воздействия электромагнитного поля в зависимости от частоты [152, 153].

Предельно допустимые уровни (ПДУ) воздействия электростатического поля ($E_{пд}$) устанавливаются Республиканскими санитарными нормами и правилами и составляют:

при воздействии до 1 часа – 60 кВ/м;

при воздействии более 1 часа величина $E_{пд}$ вычисляется по формуле

$$E_{пд} = \frac{60}{\sqrt{T}}, \quad (1.14)$$

где T – время, ч.

Если напряженность поля составляет менее 20 кВ/м, то время пребывания в поле не ограничивается. Следует отметить, что воздействие электростатического поля еще досконально не изучено, и принятые нормы отражают уровень отрицательного физиологического воздействия на человеческий организм.

Для случая воздействия переменного электрического поля ГОСТ 12.1.002-84 устанавливает предельно допустимые уровни напряженности электрического поля (ЭП) частотой 50 Гц для персонала, обслуживающего электроустановки и находящегося в зоне влияния создаваемого ими ЭП, в зависимости от времени пребывания в ЭП, а также требования к проведению контроля уровней напряженности ЭП на рабочих местах. Согласно этому нормативному документу предельно допустимый уровень напряженности воздействующего ЭП устанавливается равным 25 кВ/м; пребывание в ЭП напряженностью до 5 кВ/м включительно допускается в течение рабочего дня; при напряженности ЭП свыше 20 до 25 кВ/м время пребывания персонала в ЭП не должно превышать 10 мин.

При увеличении частоты излучений опасность радиоволн возрастает, поэтому предельно допустимые уровни напряженности электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля (ЭМП) уменьшаются. ЭМП радиочастот следует оценивать: в диапазоне частот 60 кГц-300 МГц – напряженностью электрической и магнитной составляющих поля, в диапазоне частот 300 МГц-300 ГГц – поверхностной плотностью потока энергии (далее плотность потока энергии - ППЭ) излучения и создаваемой им энергетической нагрузкой (ЭН).

Напряженность ЭМП в диапазоне частот 60 кГц-300 МГц на рабочих местах персонала в течение рабочего дня не должна превышать установленных предельно допустимых уровней:

по электрической составляющей, В/м:

50 – для частот от 60 кГц до 3 МГц;

20 – для частот от 3 до 30 МГц;

10 – для частот от 30 до 50 МГц;

5 – для частот от 50 до 300 МГц;

по магнитной составляющей, А/м:

5 – для частот от 60 кГц до 1,5 МГц;

0,3 – для частот от 30 до 50 МГц.

Предельно допустимые значения плотности потока энергии ЭМП в диапазоне частот 300 МГц-300 ГГц на рабочих местах персонала следует определять, исходя из допустимой энергетической нагрузки на организм с учетом времени воздействия, по формуле

$$\text{ППЭ}_{\text{пду}} = \frac{\text{ЭН}_{\text{пду}}}{T}, \quad (1.15)$$

где $\text{ППЭ}_{\text{пду}}$ – предельно допустимое значение плотности потока энергии, Вт/см² (мВт/см², мкВт/см²);

$\text{ЭН}_{\text{пду}}$ – нормативная величина энергетической нагрузки за рабочий день, равная:

- Вт·ч/м² (200 мкВт·ч/см²) для всех случаев облучения, включая облучение от вращающихся и сканирующих антенн;
- 20 Вт·ч/м² (2000 мкВт·ч/см²) для случаев облучения от вращающихся и сканирующих антенн с частотой вращения или сканирования не более 1 Гц и скважностью не менее 50;

T – время пребывания в зоне облучения за рабочую смену, ч (без учета режима вращения или сканирования антенн).

Максимальное значение $\text{ППЭ}_{\text{пду}}$ не должно превышать 10 Вт/м² (1000 мкВт/см²).

При воздействии на персонал ЭМП от нескольких источников суммарную интенсивность воздействия следует определять приборами с изотропными датчиками, рабочий диапазон которых включает рабочие частоты источников. В случае использования приборов с антеннами, требующими учета поляризации ЭМП, измерение напряженности или плотности потока энергии следует проводить от каждого источника в отдельности. Суммарная интенсивность воздействия оценивается следующим образом:

- в диапазоне частот 300 МГц-300 ГГц значения плотности потока энергии, измеренные от каждого источника, и создаваемые ими энергетические нагрузки суммируются; суммирование измеренных значений ППЭ не проводится в случаях облучения от двух или нескольких вращающихся или сканирующих антенн, в связи с крайне малой вероятностью одновременного облучения данной точки максимумами диаграмм двух или нескольких антенн;

- в диапазоне частот 60 кГц-300 МГц в случае источников, работающих в частотных диапазонах, для которых установлены единые значения ПДУ, суммарную интенсивность воздействия для электрической и магнитной составляющих ЭМП вычисляют по формулам

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}, \quad (1.16)$$

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + \dots + H_n^2}; \quad (1.17)$$

- в диапазоне частот 60 кГц-300 МГц в случае источников, работающих в частотных диапазонах, для которых установлены разные значения ПДУ, должно обеспечиваться следующее условие:

$$\left(\frac{E_1}{E_{\text{ПДУ1}}}\right)^2 + \left(\frac{E_2}{E_{\text{ПДУ2}}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{E_n}{E_{\text{ПДУn}}}\right)^2 \leq 1; \quad (1.18)$$

где E_1, E_2, E_n – измеренные значения напряженности электрической составляющей поля;

$E_{\text{ПДУ1}}, E_{\text{ПДУ2}}, E_{\text{ПДУn}}$ – предельно допустимые уровни воздействия электрической составляющей поля;

- в случае одновременного воздействия на персонал ЭМП с различными нормируемыми параметрами соответствие уровней облучения гигиеническим нормативам достигается при условии

$$\left(\frac{\text{ППЭ}}{\text{ППЭ}_{\text{ПДУ}}}\right) + \left(\frac{E}{E_{\text{ПДУ}}}\right)^2 \leq 1; \quad (1.19)$$

$$\left(\frac{\text{ППЭ}}{\text{ППЭ}_{\text{ПДУ}}}\right) + \left(\frac{H}{H_{\text{ПДУ}}}\right)^2 \leq 1. \quad (1.20)$$

Если работа выполняется в разных участках рабочей зоны, отличающихся интенсивностью ЭМП диапазона частот 300 МГц-300 ГГц, то суммарную энергетическую нагрузку вычисляют по формуле

$$\text{ЭН}_{\text{сум}} = \text{ППЭ}_1 T_1 + \text{ППЭ}_2 T_2 + \dots + \text{ППЭ}_n T_n, \quad (1.21)$$

где $\text{ППЭ}_1, \text{ППЭ}_2, \text{ППЭ}_n$ – значения плотности потока энергии, измеренные в отдельных участках;

T_1, T_2, T_n – время пребывания в них.

При этом $\text{ЭН}_{\text{сум}}$ не должна превышать 200 мкВт·ч/см².

Современное нормирование вредного воздействия на живой организм основано на эффекте больших доз, где опорной точкой является доза летальная (абсолютная). По мере уменьшения дозы эффект воздействия уменьшается. При дозе, которую называют недействующей, эффект исчезает. Все ПДК и ПДУ разных стран мира представляют собой несколько (в разных странах в разное число раз) уменьшенную величину дозы недействующей. Такой подход к нормированию вредного воздействия молчаливо предполагает, что при более низких дозах не может быть сильного воздействия на организм. Этот подход к нормированию называется энергетическим и имеет своей основой тепловые эффекты (локальные или общие). Однако следует отметить, что советский ГОСТ на воздействие радиочастотного излучения – норматив, который учитывает эффект низких доз.

Как было показано расчетами и подтверждено многими экспериментами, малые дозы, неспособные вызвать какой-либо нагрев живого организма, могут оказывать на него воздействие столь же сильное, как и большие дозы, вызывающие нагрев. Поэтому именно малые дозы будут в ближайшие десятилетия главной причиной, вызывающей повышенную заболеваемость населения в промышленных городах и поселках. При создании новых нормативных документов изменение подхода к нормированию вредного воздействия необходимо, чтобы со временем избавиться от вредного действия низких доз.

2. ЗАЩИТА ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Как отмечалось выше, реакция организма на ЭМП зависит от интенсивности поля, его частоты и других характеристик (например, параметров импульсной модуляции и др.). Поэтому трудно установить однозначное соответствие между реакцией организма и параметрами поля.

В зависимости от рабочего диапазона частот, характеристики выполняемых работ и интенсивности поля для защиты персонала применяются методы и средства, которые условно можно разделить на инженерно-технические, организационные и лечебно-профилактические.

2.1. Инженерно-технические методы и средства

Наиболее радикальным средством борьбы с помехами является их уничтожение или ослабление в месте возникновения, что достигается использованием экранирования, уменьшением паразитного излучения, применением направленных антенн, совершенствованием конструкций излучателей электромагнитных волн и т.д [154].

Для защиты от электрических и магнитных полей различных диапазонов применяют комплекс инженерно-технических мер. При защите от электростатического поля (ЭСП) основными мерами уменьшения напряженности ЭСП в рабочей зоне являются:

- экранирование источников поля или рабочего места;
- применение нейтрализаторов статического электричества;
- применение антистатических препаратов или увлажнение электризующихся материалов;
- замена, по возможности, легко электризующихся материалов и изделий на не электризующиеся;
- подбор контактирующих поверхностей, исходя из условий наименьшей электризации;
- уменьшение скорости переработки и транспортировки материалов;
- поддержание оптимальной относительной влажности (не ниже 60 %), ионного состава воздуха рабочих помещений;
- удаление зон пребывания обслуживающего персонала от источников электростатических полей.

В качестве индивидуальных средств защиты следует применять антистатические обувь, халаты и другие средства, обеспечивающие заземление тела человека.

Для индивидуальной защиты от электрического поля промышленной частоты необходимо применять индивидуальные экранирующие комплекты, состоящие из электропроводящих куртки (или халата) с капюшоном, рукавиц

(перчаток) и ботинок (сапог). Качество спецодежды контролируется с помощью специальных установок и "клетки Фарадея" [155].

Инженерные меры защиты от электромагнитного поля радиочастоты и СВЧ включают в себя экранирование, применение средств индивидуальной защиты, уменьшение напряженности и плотности потока энергии в рабочей зоне за счет уменьшения мощности самого источника (если позволяют технические условия) и посредством использования согласованных нагрузок и поглотителей мощности [156].

В настоящее время для защиты от ЭМИ применяются средства индивидуальной защиты (СИЗ) - радиозащитные костюмы, халаты, комбинезоны, защитные маски, фартуки, очки и др. Ввиду того, что СИЗ стесняют движения работающего и несколько ухудшают гигиенические условия, их используют лишь в особых случаях, например, при ремонтных работах в аварийных ситуациях, во время кратковременных настроечных и измерительных работах с радиотехническим оборудованием и в антенном поле радиотехнических станций. Они изготавливаются из хлопчатобумажной ткани с микропроводом и, в принципе, представляют собой сетчатые экраны [157].

В помещениях при защите от внешних излучений применяется оклеивание стен специальными металлизированными обоями, засетчивание окон, применение специальных металлизированных штор и т.п.

Снижение напряженности электромагнитных полей ВЧ и УВЧ на радио- и телестанциях, узлах электро- и радиосвязи достигается экранировкой действующих передатчиков и рациональным размещением отдельных ВЧ и УВЧ блоков в рабочих помещениях либо организацией дистанционного управления передатчиками.

Для снижения уровня ЭМП на рабочих местах и в залах передатчиков необходимо:

- улучшить экранировку шкафов передатчиков, жалюзей и смотровых окон, устранить щели в металлическом корпусе;

- контролировать экранирование фидеров в помещениях и на антенных полях; осуществлять коммутацию электромагнитной энергии с помощью общих антенных коммутаторов, вынесенных в отдельные экранированные помещения. Подключение передатчиков к коммутаторам должно исключать прохождение незэкранированных фидеров в рабочих помещениях;

- обеспечить создание надежного электрического контакта в металлических соединениях устройств схем сложения и разделительных фильтров, и заземление фидерных линий, по которым не происходит передача энергии, для устранения паразитных наводок на них.

Для исключения паразитных наводок на провода осветительной сети, отопительные приборы и водопроводные трубы необходимо:

- а) устанавливать фильтры на диапазон частот работающих станций у мест ввода проводов осветительной сети в помещение;

б) производить электропроводку экранированным проводом с заземленным экраном;

в) дополнительно заземлять отопительные приборы и водопроводные трубы на обособленное от установки заземление.

Еще одним конструктивным приемом уменьшения паразитных высокочастотных излучений является применение различных дроссельных устройств, через которые необходимо обеспечивать настройку аппаратуры, находящейся в экранируемом пространстве.

Принцип действия дросселей заключается в том, что благодаря определенному конструктивному выполнению механического привода электрический контакт размещается в узле стоячей волны тока, при этом требования к качеству контакта значительно снижаются. В длинноволновой части СВЧ диапазона дроссели конструктивно выполняются на сосредоточенных LC элементах и представляют обычные заграждающие фильтры, методы расчета параметров которых хорошо известны. Достижимое значение экранного затухания при наличии дросселей составляет примерно 30-40 дБ.

Экранирование излучателей, помещений и рабочего места является одним из основных способов защиты от ЭМП. При этом используются такие свойства различных материалов, как поглощение и отражение электромагнитной энергии. Поглощение обусловлено тепловыми потерями в толщине материала, а отражение - в основном, различием электромагнитных свойств воздуха и материала экрана. В результате отражения и поглощения электромагнитная энергия частично отражается от поверхности экрана, частично затухает в материале экрана и частично проходит сквозь экран. Отражение и прохождение энергии определяются через коэффициенты отражения $K_{отр}$ и прохождения $K_{прох}$, выражающиеся отношением соответственно отраженной и прошедшей энергии к падающей.

При попадании ЭМП на границу раздела сред, характеризующихся различными свойствами (например, различное волновое сопротивление в металле и в воздухе), электромагнитная энергия частично проходит через нее, продолжая распространяться в новой среде, и частично отражается, причем коэффициент отражения зависит от соотношения волновых сопротивлений сред.

Большая отражательная способность металлов в ряде случаев может оказаться нежелательной. Поэтому в зависимости от практической целесообразности материалы для экранирования изготавливаются либо с большим коэффициентом отражения (металлические листы, сетки), либо с малым коэффициентом отражения (различные радиопоглощающие материалы).

В тех случаях, когда имеются только паразитные излучения волн (утечки из щелей в линиях передачи СВЧ энергии, из катодных выводов магнетрона и т.п.) и отражения ЭМИ от стенок экранирующего устройства не оказывают влияния на технологический процесс и режим работы излучателя, экранирование может быть сделано без поглощающих покрытий.

Если же производственный процесс основан на непосредственном излучении энергии в пространство (например, при испытании антенных устройств), полное или частичное экранирование источника металлическими экранами может привести к нарушению технологического процесса (изменение режима работы, пробой генераторных ламп передатчиков, изменение его рабочей частоты и т.д.). Кроме того, большая отражательная способность металлических экранов при их применении для экранирования помещения может привести к увеличению интенсивности поля в рабочей зоне. В подобных случаях рационально было бы использовать поглощающие экраны и покрытия.

При разработке радиопоглощающих материалов, подбирая специальные вещества с градиентом электромагнитных характеристик (ϵ , μ и σ) по толщине материала, добиваются обеспечения наиболее плавного перехода от волновых характеристик воздуха к характеристикам материала экрана (с целью уменьшения отражения) и наиболее полного поглощения электромагнитной энергии в экране [158]. Уменьшение отражения ЭМП от поверхности радиопоглощающих материалов добиваются, например, тем, что материалу придается структура или форма, увеличивающая его активную поверхность, обращенную к излучению. Материал делается волокнистым или пористым, со сложной, покрытой пирамидами или конусами поверхностью. Падая на такую поверхность, электромагнитная волна многократно отражается и теряет значительно больше энергии, чем при падении на ровную поверхность. Подобного эффекта добиваются, когда слои поглощающего материала (активированный уголь, сажа, порошок карбонильного железа и т.п.) располагают в порядке возрастания плотности по мере удаления от внешней поверхности экрана, либо постепенно увеличивая концентрацию проводящих добавок по мере удаления от поверхности материала. Экраны, выполненные из таких материалов, поглощают электромагнитную энергию в широком диапазоне частот и являются широкополосными.

В связи с тем, что большинство радиопоглощающих материалов имеет значительный вес (их толщина пропорциональна длине волны), высокую стоимость, а также некоторые недостатки (чувствительность к воде, пыли, подверженность быстрой эрозии и т.п.), их широкое применения в технике защиты от ЭМП ограничено.

Для защиты информации, обрабатываемой ПЭВМ и циркулирующей в ЛВС, разработаны некоторые специфические методы и средства. Информативный сигнал в сети электропитания имеет достаточную для перехвата злоумышленником мощность и широкий частотный диапазон, что усложняет задачу защиты информации. Таким образом, при соблюдении определенных энергетических и временных условий может возникнуть электромагнитный канал утечки конфиденциальной информации.

Для минимизации паразитных связей внутри ПЭВМ используются разные схемотехнические решения: применение радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов; экранирование корпусов элементов и оптимальное построение системы электропитания ПЭВМ; установка помехоподавляющих фильтров в цепях

электропитания, в сигнальных цепях интерфейсов и на печатных платах ПЭВМ [159]. Для предотвращения паразитной связи через электромагнитное поле совместно пролегающие кабели ЛВС и системы электропитания разносятся на безопасное расстояние. Также применяется фильтрация, прокладка цепей электропитания в экранирующих конструкциях, скрутка проводов электропитания и др.

Использование активных средств защиты информации (шумовых генераторов) не всегда возможно из-за требований электромагнитной совместимости; кроме того, проведение защитных мероприятий нередко требует приобретения значительного количества средств защиты (как пассивных, так и активных), что зачастую ограничено финансовыми средствами.

Наибольшая трудоемкость при реализации защиты персонального компьютера касается дисплейного блока, в меньшей степени – печатающего устройства, накопителей на дисках, компакт-кассетах, однако необходима доработка каждого устройства, входящего в состав персонального компьютера [160].

Основными действиями при защите информации от утечки по техническим каналам являются:

- снижение спектральной мощности ПЭМИН;
- уменьшение информативности ПЭМИН;
- маскирование информативных ПЭМИН;
- взаимные и специально создаваемые помехи;
- правильное и оптимальное проектирование кабельных систем.

При построении кабельных систем большое внимание уделяется применяемым кабелям. Общее экранирование кабеля снижает уровень излучения и повышает невосприимчивость к шумовым помехам, но не улучшает рабочие характеристики между парами. Недостатком кабелей, экранированных оболочкой из фольги, является то, что они подвержены низкочастотным электромагнитным помехам. Кроме того, экранирование в общем случае ухудшает характеристики кабеля по затуханию сигнала. Это повышенное значение затухания является следствием добавочной емкости между экраном и витыми парами [161]. Наиболее приемлемым материалом для изготовления экранов является сталь листовая. Конструкция швов экрана должна обеспечивать надежный электрический контакт с низким переходным сопротивлением высокочастотным токам по периметру соединяемых деталей экрана. Для обеспечения этого требования соединение листов экрана должно производиться герметичным швом электродуговой сварки в среде защитного газа.

2.2. Организационные и лечебно-профилактические мероприятия

К организационным мероприятиям относятся: рациональное размещение в рабочем помещении оборудования, излучающего электромагнитную энергию, и рабочих мест; удаление рабочего места от источника ЭМП; установление

рациональных режимов работы оборудования и обслуживающего персонала; ограничение работы оборудования во времени (за счет уменьшения времени наладочных и ремонтных работ); применение средств предупреждающей сигнализации (световая, звуковая и т.п.), а также проведение инструктажа о правилах техники безопасности при работе в радиочастотном поле [162].

Лечебно-профилактические мероприятия направлены на предупреждение заболевания, которое может быть вызвано воздействием ЭМП, а также на лечение работающих при обнаружении профессионального заболевания. Лица, не достигшие 18-летнего возраста, к работам с источниками ЭМП радиочастот не допускаются. Обязателен предварительный и периодический медицинский контроль лиц, работающих на участках с повышенным уровнем излучений. Для повышения устойчивости организма разрабатывают специальные диеты, комплексы физических упражнений, способы рациональной организации и планирования работы.

Согласно санитарным нормам и правилам, площадки для размещения передающих длинноволновых, средневолновых и коротковолновых радиостанций, телецентров, телевизионных ретрансляторов, радиолокационных станций, радиорелейных линий связи необходимо выбирать с учетом мощности объекта и конструктивных особенностей антенн с таким условием, чтобы уровень электромагнитной энергии на территории жилой застройки не превышал норму.

Передающие радиоцентры, радиостанции, телецентры при мощности одного передатчика или суммарной мощности нескольких передатчиков более 100 кВт, а также обзорные радиолокационные станции следует размещать за пределами населенных мест с выполнением условий, обеспечивающих соблюдение установленных предельно допустимых уровней электромагнитной энергии.

При покупке и эксплуатации бытовой техники необходимо придерживаться следующих правил:

1) Приобретая бытовую технику, проверяйте в Гигиеническом заключении (сертификате) отметку о соответствии изделия требованиям "Межгосударственных санитарных норм допустимых уровней физических факторов при применении товаров народного потребления в бытовых условиях", МСанПиН 001-96;

2) Используйте технику с меньшей потребляемой мощностью: магнитные поля промышленной частоты будут меньше при прочих равных условиях;

3) К потенциально неблагоприятным источникам магнитного поля промышленной частоты в квартире относятся холодильники с системой "без инея", некоторые типы "теплых полов", нагреватели, телевизоры, некоторые системы сигнализации, различного рода зарядные устройства, выпрямители и преобразователи тока – спальное место должно быть на расстоянии не менее 2-х метров от этих предметов, если они работают во время Вашего ночного отдыха;

4) При размещении в квартире бытовой техники необходимо пользоваться принципами снижения отрицательного влияния приборов путем максимального удаления источников излучения от потребителей, оптимальной расстановки мебели и техники (рис. 2.1).

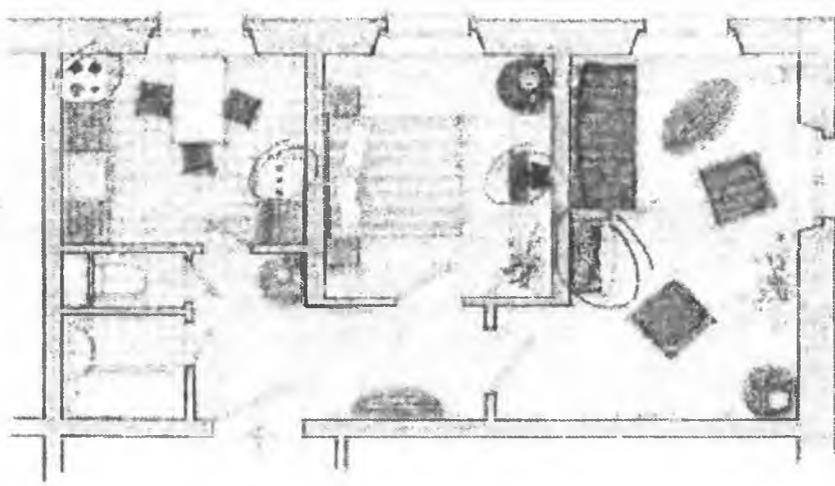


Рис. 2.1а. Вариант неправильного размещения бытовых приборов в помещении квартиры

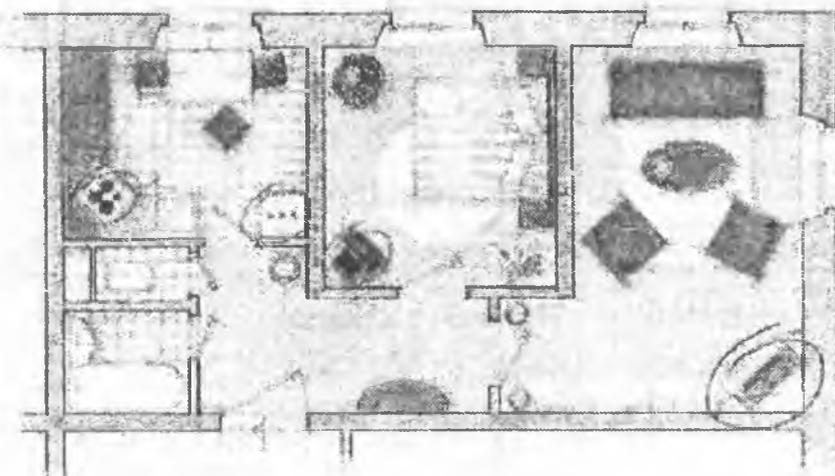


Рис. 2.1б. Вариант правильного размещения бытовых приборов в помещении квартиры

2.3. Измерительное и метрологическое оборудование

2.3.1. Измерители электростатического потенциала

ИЭСП-6. Измеритель ИЭСП-6 предназначен для измерения электростатического потенциала на заряженных поверхностях.



Рис. 2.1 Измеритель ИЭСП-6

Технические характеристики измерителя ИЭСП-6

| | |
|---|-----------------------|
| Пределы измерения: | $\pm (0,1\sim 10)$ кВ |
| Напряжение питания: | 9 В $\pm 10\%$ |
| Потребляемый ток: | не более 1,5 мА |
| Габаритные размеры: | 230x90x30 мм |
| Масса: | не более 0,4 кг |
| Предел основной погрешности прибора: | не более $\pm 10\%$ |
| Прибор позволяет определять знак электростатического потенциала | |
| Средний срок службы: | не менее 10 лет |

Прибор позволяет контролировать величину электростатического потенциала на оконечных устройствах средств отображения информации вычислительной техники (дисплеях, видеомониторах, видеомодулях и видеодисплейных терминалах) в соответствии с ГОСТ Р 50948-96, ГОСТ Р 50949-96 и СанПин 2.2.2.542-96.

Сертификат об утверждении типа средств измерения № 2836 от 15.07.1997г. Прибор зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 16382-97 и допущен к применению в Российской Федерации.

ИЭСП-6М. Измеритель ИЭСП-6М предназначен для измерения величин электростатических потенциалов.

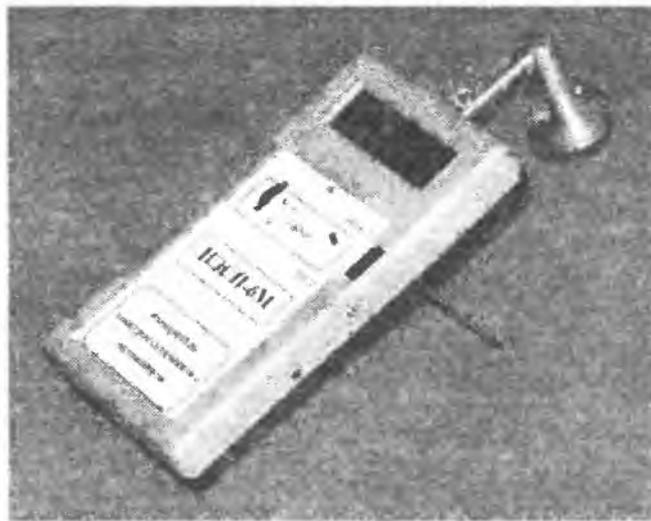


Рис. 2.2 Измеритель ИЭСП-6М

Технические характеристики измерителя ИЭСП-6М

| | |
|---|------------------------|
| Пределы измерения: | $\pm (10\sim 2000)$ кВ |
| Напряжение питания: | 9 В $\pm 10\%$ |
| Потребляемый ток: | не более 1,5 мА |
| Габаритные размеры: | 170x90x30 мм |
| Масса: | не более 0,4 кг |
| Предел основной погрешности прибора: | не более $\pm 20\%$ |
| Прибор позволяет определять знак электростатического потенциала | |
| Средний срок службы: | не менее 10 лет |

Прибор позволяет измерять электростатические потенциалы в различных технологических процессах на заряженных поверхностях, в порошкообразных и жидких средах.

Прибор используется в микроэлектронной, химической и легкой промышленности.

2.3.2. Измерители напряженности электростатического, магнитного и электрического полей

ИЭСП-7. Измеритель ИЭСП-7 предназначен для измерения напряженности электростатического поля в пространстве.



Рис. 2.3 Измеритель ИЭСП-7

Технические характеристики измерителя ИЭСП-7

| | |
|---|----------------------|
| Пределы измерения: | $\pm (2-199,9)$ кВ/м |
| Напряжение питания: | 9 В $\pm 10\%$ |
| Потребляемый ток: | не более 2 мА |
| Габаритные размеры: | 230x90x30 мм |
| Масса: | не более 0,4 кг |
| Предел основной погрешности прибора: | не более $\pm 10\%$ |
| Прибор позволяет определять знак электростатического потенциала | |
| Средний срок службы: | не менее 10 лет |

Прибор позволяет измерять напряженность электростатического поля в пространстве в соответствии с ГОСТ 12.1.045-84. ССБТ "Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля".

Сертификат об утверждении типа средств измерений № 5205 от 01.07.1998 г. Прибор зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений под № 17405-98 и допущен к применению в Российской Федерации.

ИНЭП-8. Измеритель ИНЭП-8 предназначен для измерения напряженности электрического поля промышленной частоты (50 Гц) в пространстве.

Прибор позволяет измерять напряженность электрического поля в пространстве в соответствии с ГОСТ 12.1.002-84 "Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля" и "Санитарными нормами и правилами защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты".

Технические характеристики измерителя ИНЭП-8

| | |
|---|------------------------|
| Пределы измерения: | $\pm (0,1-199,9)$ кВ/м |
| Напряжение питания: | 9 В \pm 10% |
| Потребляемый ток: | не более 2 мА |
| Габаритные размеры: | 230x90x30 мм |
| Масса: | не более 0,4 кг |
| Предел основной погрешности прибора: | не более \pm 15% |
| Прибор позволяет определять знак электростатического потенциала | |
| Средний срок службы: | не менее 10 лет |

Сертификат об утверждении типа средств измерений № 8175 от 27.07.2000 г. Прибор зарегистрирован в государственном реестре средств измерений под № 19811-00 и допущен к применению в Российской Федерации.

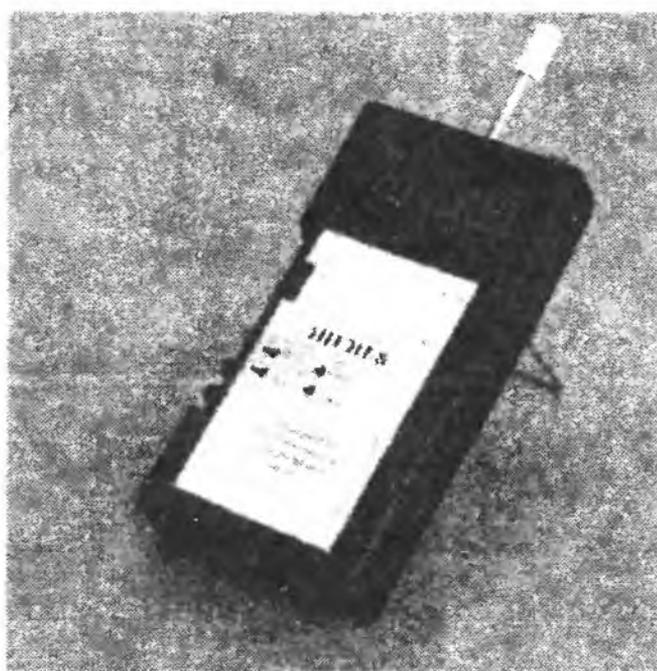


Рис. 2.4 Измеритель ИНЭП-8

ИМП-9. Измеритель ИМП-9 предназначен для измерения индукции (напряженности) магнитного поля промышленной частоты (50 Гц) в пространстве.

Технические характеристики измерителя ИМП-9

| | |
|--------------------|----------------|
| Пределы измерения: | |
| 1-ый диапазон: | 100-500 мкТл |
| 2-ой диапазон: | 500-20000 мкТл |

| | |
|---|-----------------|
| Напряжение питания: | 9 В ±10% |
| Потребляемый ток: | не более 2 мА |
| Габаритные размеры: | 170x90x30 мм |
| Масса: | не более 0,5 кг |
| Предел основной погрешности прибора: | не более ±10% |
| Прибор позволяет определять знак электростатического потенциала | |
| Средний срок службы: | не менее 10 лет |

Прибор позволяет измерять индукцию (напряженность) магнитного поля промышленной частоты (50 Гц) в соответствии с СанПиН 2.2.4.723-98.



Рис. 2.5 Измеритель ИМП-9

ИПМ-101. Измеритель предназначен для контроля в соответствии с ГОСТ 12.1.006, ГН 2.1.8/2.2.4.019 и СанПиН 2.2.4/2.1.8.055 за соблюдением предельно допустимых уровней высокочастотных излучений на рабочих местах персонала, обслуживающего электрорадиотехнические установки и системы, излучающие электромагнитное поле.

Измеритель выполнен в виде малогабаритного носимого прибора с автономным питанием и включает в себя: антенны-преобразователи (АП) направленного приема, устройство отсчетное УО-101/УО-101М и футляр для переноски.

Для измерения напряженности электрического поля предназначены АП Е01 и Е02

Для измерения напряженности магнитного поля предназначены АП Н01 и Н02

Измеритель в стандартном варианте поставки комплектуется АП Е01

Антенны Е02, Н01, Н02 поставляются по дополнительному заказу

Дополнительные возможности ИПМ-101М:

- Прямой отсчет измеряемых величин (В/м, мкВт/см², А/м).
- Автоматическое определение типа подключенной АП.
- Автоматический учет частотных коэффициентов подключенной АП.

- Измерение напряженности поля методом измерения проекции вектора напряженности поля на измерительную ось АП и трехортогональным методом при полной автоматизации процесса вычисления конечного значения измеряемой величины.
- Непрерывный контроль пользователем степени разряда батареи питания.
- Регулировка пользователем постоянной времени измерения.

Таблица 2.1

Технические характеристики измерителя ИПМ-101

| Антенна-преобразователь | Диапазон частот | Диапазон измерения |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Е01 (электрическое поле) | 0,03-1200 МГц, 2,4-2,5 ГГц | 1-100 В/м |
| Е02 (электрическое поле) | 0,03-1200 МГц, 2,4-2,5 ГГц | 5-500 В/м |
| Н01 (магнитное поле) | 0,03-3 МГц | 0,5-50 А/м |
| Н02 (магнитное поле) | 1-50 МГц | 0,1-10 А/м |

Прибор ИПМ-101 зарегистрирован в Госреестре средств измерений России № 17153-98.

| | |
|---|-------------------------|
| Погрешность в диапазоне измерения | 20-40 % |
| Дополнительная погрешность | не превышает 0,6 % / °С |
| Погрешность не превышает указанных значений при расстоянии от проводящих тел до точки измерения более 0,2м (для АП Е02 более 0,05м) | |
| Температура окружающего воздуха | от -10 до +40 °С |
| Относительная влажность воздуха | до 90 % |
| Атмосферное давление | 630-795 мм рт. ст. |
| Батарея | 9,0±1,5 В |
| Время непрерывной работы в автономном режиме | не менее 16 ч |
| Габариты и масса составных частей измерителя, не более | |
| АП Е01, Е02, Н01 и Н02 | 330x110x25 мм; 0,2 кг |
| Устройство отсчетное УО-101 | 150x80x25 мм; 0,25 кг |
| Футляр с составными частями измерителя | 440x390x90 мм; 2,5 кг |

ЭСПИ-301. Измерение в свободном пространстве напряженности электростатического поля, создаваемого при электризации диэлектрических материалов и эксплуатации электроустановок высокого напряжения постоянного тока для контроля в соответствии с ГОСТ 12.1.045-84 предельно допустимых уровней электростатического поля на рабочих местах.

Измерение напряженности электростатического поля между заземленной металлической пластиной и экраном дисплея для контроля в соответствии с ГОСТ Р 50948-96, ГОСТ Р 50949-96 и СанПиН 2.2.2.542-96 предельно допустимых

уровней электростатического поля, создаваемого средствами отображения информации на электронно-лучевых трубках.

Существуют следующие модификации измерителя ЭСПИ-301:

ЭСПИ-301А - Предназначен для проведения измерений напряженности ЭСП в свободном пространстве.

ЭСПИ-301Б - Предназначен для проведения измерений напряженности ЭСП между заземленной металлической пластиной и экраном дисплея.

ЭСПИ-301В - Совмещает функции комплектов ЭСПИ-301А и ЭСПИ-301Б.

Технические характеристики измерителя ЭСПИ-301. При измерении напряженности электростатического поля в свободном пространстве:

| | |
|--|-----------------------------|
| Рабочий диапазон измерения | от 0,3 до 180 кВ/м |
| Пределы допускаемой основной погрешности измерения | $\pm[15 + 0,2(E_n/E_x)] \%$ |

где: E_x и E_n - измеренное значение напряженности электростатического поля и значение установленного предела измерения (20 или 200 кВ/м), соответственно

При измерении напряженности электростатического поля между металлической пластиной и экраном дисплея:

| | |
|--|------------------------------|
| Рабочий диапазон измерения | от 1,5 до 200 кВ/м |
| Пределы допускаемой основной погрешности измерения | $\pm[10 + 0,2F(E_n/E_x)] \%$ |

где: E_x и E_n - измеренное значение напряженности электростатического поля и значение установленного предела измерения (20 или 200 кВ/м), соответственно.

Общие характеристики:

| | |
|---|----------------------------------|
| Температура окружающего воздуха | от +5 до +40 °С |
| Относительная влажность воздуха | до 90% |
| Атмосферное давление | 84-106 кПа (630-795 мм. рт. ст.) |
| Источник питания | 4 пальчиковых элемента (АА) |
| Время работы без замены источника питания | не менее 16 часов |
| Габаритные размеры футляра с измерителем | не более 440х390х90 мм |
| Масса футляра с измерителем | 3-5 кг |

Прибор ЭСПИ-301 зарегистрирован в Госреестре средств измерений России № 17401-98.

ПЗ-50. • Измеритель предназначен для измерения напряженности электрического и магнитного поля промышленной частоты (50 Гц) и применяется для контроля предельно допустимых уровней электрического и магнитного поля согласно ГОСТ 12.1.002-84 и СН №3206-85.

Измеритель выполнен в виде малогабаритного носимого прибора с автономным питанием. Основными элементами измерителя являются устройство отсчетное УОЗ-50 и антенны-преобразователи (АП) направленного приема.

Для измерения напряженности электрического поля предназначена АП
ЕЗ-50

Для измерения напряженности магнитного поля предназначена АП НЗ-50

Существуют следующие модификации измерителя ПЗ-50:

ПЗ-50А - Предназначен для измерения напряженности электрического поля.

ПЗ-50Б - Предназначен для измерения напряженности магнитного поля.

ПЗ-50В - Совмещает функции комплектов ПЗ-50А и ПЗ-50Б.

Технические характеристики измерителя ПЗ-50.

| | |
|--|-----------------------------|
| Диапазон измерения напряженности электрического поля | от 0,01 до 180 кВ/м |
| Пределы измерения | 0,2; 2; 20 и 200 кВ/м |
| Диапазон измерения напряженности магнитного поля | от 0,01 до 1800 А/м |
| Пределы измерения | 0,2; 2; 20; 200 и 2000 А/м |
| Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерения напряженности электрического поля | $\pm[15 + 0,2(E_n/E_x)] \%$ |
| где: E_n - установленный предел измерения, E_x - измеренное значение напряженности электрического поля, кВ/м | |
| Пределы допускаемой относительной основной погрешности измерения напряженности магнитного поля | $\pm[15 + 0,2(H_n/H_x)] \%$ |
| где: H_n - установленный предел измерения, H_x - измеренное значение напряженности магнитного поля, А/м | |
| Источник питания | 4 сменных элемента по 1,5 В |
| Время непрерывной работы в автономном режиме | не менее 16 ч |
| Габариты и масса составных частей измерителя не более | |
| АП ЕЗ-50 и НЗ-50 | 450x110x40 мм; 0,8 кг |
| Устройство отсчетное УОЗ-50 | 170x85x45 мм; 0,5 кг |
| Измеритель в футляре для переноски | 440x390x90; 3,0 кг |

Прибор ПЗ-50 зарегистрирован в Госреестре средств измерений России № 17638-98.

2.3.3. Измерители электромагнитного поля

EMR-20 (200), EMR-30 (300). Измерители электромагнитного поля позволяют производить изотропные (ненаправленные) измерения напряженности высокочастотных электрических полей, создаваемых различными источниками: радиовещательными и телевизионными передатчиками, медицинским оборудованием, радарам, передатчиками систем радио- и сотовой связи, микроволновыми печами и т.п., а так же измерения в безэховых и ТЕМ-камерах.

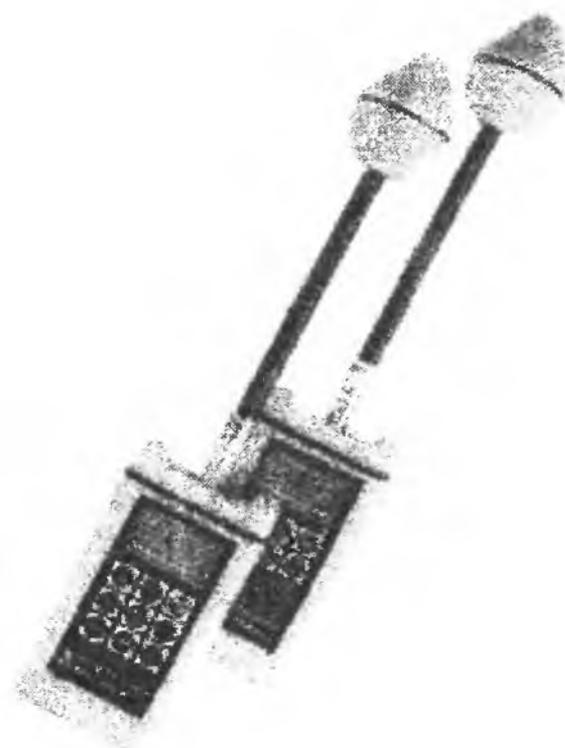


Рис. 2.6 Измерители EMR-20, EMR-30

Показания прибора в процентах от устанавливаемого граничного значения.

- Непосредственное подключение к персональному компьютеру через волоконно-оптический двунаправленный последовательный интерфейс V.24 (RS 232) для передачи результатов измерений, дистанционного управления и калибровки.
- хранение 1500 значений результатов измерений (только для EMR-30).
- обработка полученных данных с помощью широкодоступных программ (например, Microsoft® Excel™).

Технические характеристики измерителей EMR-20, EMR-30.

| | | |
|-----------------------------------|--|--|
| Диапазон частот | | от 100 кГц до 3 ГГц |
| Диапазоны измеряемых величин | | 1,0 - 800 В/м; 0,27 мкВт/см ² - 170 мВт/см ² |
| Приведенная погрешность измерений | | ± 1 дБ |
| Разрешение дисплея | | 0,01 В/м |
| Величины | | В/м, А/м, мВт/см ² , Вт/м ² , % от заданной величины |
| Выводимые результаты | | текущее значение или максимальное значение с момента включения |

| | |
|------------------|--|
| Усреднение | текущее значение или результат усреднения за 6 минут |
| Дисплей | ЖКИ многофункциональный |
| Самотестирование | при включении |

Особенности EMR-30

| | |
|-----------------------------|--|
| Хранение результатов | 1500 значений |
| Часы реального времени | |
| Пространственное усреднение | по заданному интервалу времени или по точкам измерений |

Основные характеристики

| | |
|--------------------------------------|---------------------|
| Габаритные размеры (с датчиком) | 96x64x465 мм |
| Масса (с элементами питания) | 450 г |
| Источник питания | |
| Аккумуляторы | 2xMignon (AA) 1,2 В |
| Батареи | 2xMignon (AA) 1,5 В |
| Продолжительность непрерывной работы | |
| С аккумуляторами | 8 ч |
| С батареями | 15 ч |

Условия применения

| | |
|---------------------------------|----------------|
| Температура окружающей среды | от 0 до +50 °С |
| Относительная влажность воздуха | от 25 до 75 % |

2.3.4. Анализаторы поля

EFA-1/2. Прибор позволяет выполнить измерения магнитной составляющей низкочастотных электромагнитных полей, создаваемых различными источниками: линиями электропередач переменного тока, трансформаторными подстанциями, промышленными и бытовыми электроприборами, средствами визуального отображения информации (дисплеями компьютеров и телевизорами) и т.п.

EFA-1 и EFA-2 компактны, имеют питание от малогабаритных батарей и просты в использовании. Оптимизированы для персонального применения, как указано в рекомендациях (IRPA, WHO, VDE, NRPB, IEEE). Подключение к компьютеру через волоконно-оптический интерфейс RS 232 для передачи результатов измерений. Автоматическое проведение измерений длительностью до 24 часов. Хранение 4095 значений результатов измерений (EFA-2). Обработка полученных данных с помощью широкодоступных программ (например, Microsoft® Excel™). Развитые функции фильтрации сигнала - полосовые фильтры для всех промышленных частот и их гармоник, полосовой фильтр для частоты, выбранной пользователем (EFA-2). Встроенный частотомер. Меню пользователя (EFA-2).

Возможность поставки программных средств расчета переменного магнитного поля с учетом множественных источников.

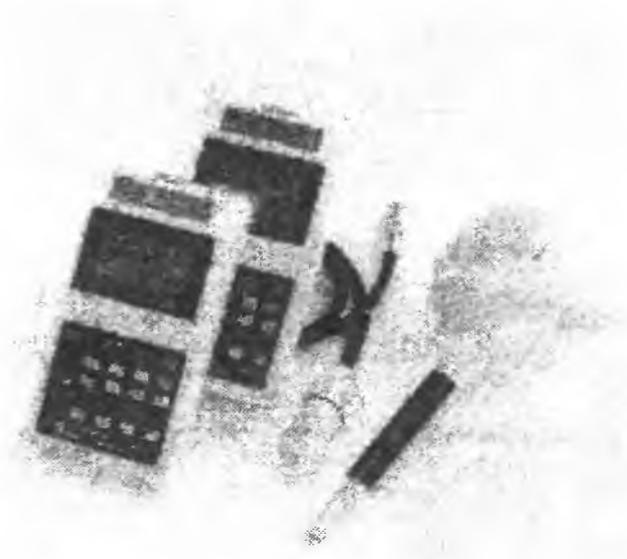


Рис. 2.7 Измерители EFA-1, EFA-2

Таблица 2.2

Технические характеристики измерителей EFA-1, EFA-2

| | Со встроенным датчиком магнитного поля | С дополнительным прецизионным датчиком магнитного поля |
|--------------------------------------|--|---|
| Диапазон частот | 5 Гц - 30 кГц (3 дБ) | |
| Принцип измерения | Изотропное измерение действующих (среднеквадратических) или пиковых значений | |
| Измерения | Изотропные или однокоординатные | |
| Предел измерений на частоте 50/60 Гц | от 50 нТл до 10 мТл от 5 нТл до 10 мТл с полосовым фильтром | от 10 нТл до 10 мТл от 1 нТл до 10 мТл с полосовым фильтром |
| Точность значений на дисплее | 0,1 % | |
| Точность измерений | от 50 Гц до 400 Гц, широкополосный (5 Гц - 2 кГц) или выбираемый | |
| | ± 5 %, В > 500 нТл | ± 3%, ± 1 нТл, В > 40 нТл |
| | от 50 Гц до 5 кГц, широкополосный (5 Гц - 30 кГц) или выбираемый | |
| | ± 8%, В > 500 нТл | ± 3%, ± 1 нТл, В > 40 нТл |
| | 16,7 Гц, широкополосный (5 Гц до 2 кГц) или выбираемый | |
| | ± 6%, В > 500 нТл | ± 5%, ± 1 нТл, В > 40 нТл |
| Функции фильтрации | Широкополосные измерения с функцией частотомера: 5 Гц - 2 кГц; 5 Гц - 30 кГц; 30 Гц - 2 кГц; 30 Гц - 30 кГц Полосовая фильтрация: 16,67 Гц; 50 Гц; 60 Гц; 400 Гц; 2-е и 3-и гармоники | |

ЕТМ-1. Прибор разработан для измерений уровней постоянного магнитного поля, источниками которого являются, например, медицинское оборудование, металлургические печи и транспорт на электрической тяге.

ЕТМ-1 дополняет семейство анализаторов полей ЕФА-1 – ЕФА-2, обеспечивая измерения постоянных магнитных полей. Прибор имеет как автоматический так и ручной выбор диапазона измерений. Результаты представляются на ЖК дисплее (3¹/₂ символа). Возможны измерения по одной или трем осям. Датчик соединяется с прибором экранированным кабелем длиной 1,5 м.

В измерительной головке установлены три датчика, сигналы с которых обрабатываются в измерителе отдельно. Результатом является геометрическая сумма измеренных значений.

Для дистанционного управления ЕТМ-1 используется интерфейс RS-232.

Технические характеристики измерителей ЕТМ-1.

| | |
|-------------------------------|------------------------------|
| Характеристика направленности | Изотропная, трехкоординатная |
| Диапазон измерений | 0,1 мТл - 1999 мТл |
| Тип датчиков | Датчик Холла |
| Диапазон частот | 0 Гц |
| Точность измерений | 2% |

Основные характеристики

| | |
|-------------------------------------|---|
| Источник питания | Литиевая батарея 9 В или сетевой блок питания |
| Время непрерывной работы от батареи | 15 ч |
| Размеры измерителя | 160x80x30 мм |
| Размеры измерительной головки | 12x12x100 мм |
| Вес | 250 г |
| Диапазон рабочих температур | от 0 до +40 °С |

2.3.5. Радиолюбительские конструкции

2.3.5.1. Простой детектор радиоволн

Устройство представляет собой простейший детектор радиоволн со звуковой индикацией (рис. 2.8). Детектор радиоволн чувствителен к частотам вплоть до 500 МГц. Настраивать детектор при поиске работающих передатчиков можно путем изменения длины телескопической приемной антенны.

Телескопическая приемная антенна воспринимает высокочастотные электромагнитные колебания в диапазоне до 500 МГц, которые затем детектируются диодом VD1 (Д9Б). Высокочастотная составляющая сигнала отфильтровывается дросселем L1 и конденсатором C1 (10 нФ). Низкочастотный сигнал поступает через

резистор R1 (3,3 кОм) на базу транзистора VT1 (КТ315), что приводит к открыванию последнего и, как следствие, к открыванию транзистора VT2 (КТ361). При этом на резисторе R4 (10 кОм) появляется положительное напряжение, близкое к напряжению питания, которое воспринимается логическим элементом DD1.1 микросхемы DD1 (К561ЛА7) как уровень логической единицы. При этом включается генератор импульсов на элементах DD1.1, DD1.2, R5 (51 кОм) и C3 (1000 пФ). С его выхода импульсы с частотой 2 кГц поступают на вход буферного каскада на элементах DD1.3, DD1.4. Нагрузкой этого каскада служит звуковой пьезокерамический преобразователь ZQ1 (ЗП-1), который преобразует электрические колебания частотой 2 кГц в акустические. С целью увеличения громкости звучания преобразователь ZQ1 включен между входом и выходом элемента DD1.4 микросхемы DD1. Питается детектор от источника тока напряжением 9 В через параметрический стабилизатор на элементах VD2 (КС 156), R6 (330 Ом) [163].

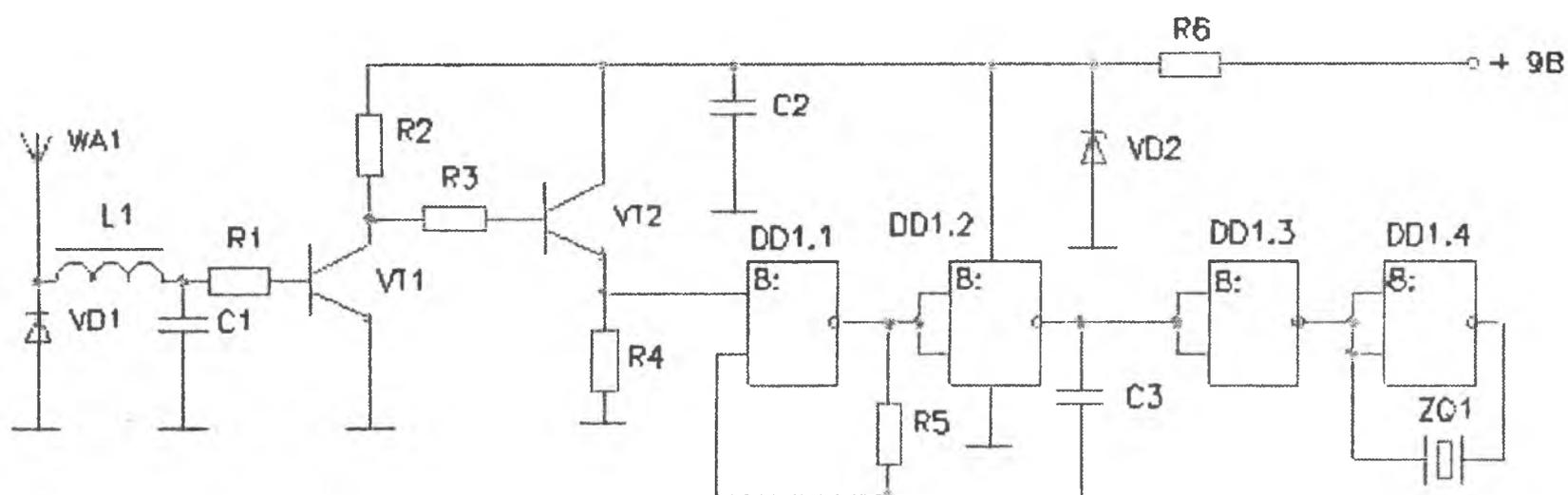


Рис. 2.8 Схема электрическая принципиальная простого детектора радиоволн

2.3.5.2. Детектор поля со звуковой сигнализацией и регулировкой чувствительности

Данное устройство отличается более высокой чувствительностью и возможностью регулировки чувствительности (рис. 2.9) [163].

Сигнал, принимаемый антенной, усиливается широкополосным трехкаскадным апериодическим услителем высокой частоты на транзисторах VT1-VT3 типа КТ3101. Усиленный сигнал с нагрузки транзистора VT3, резистора R10, через конденсатор C9 поступает на детектор, собранный по схеме удвоения напряжения на диодах VD1, VD2. Положительное напряжение с регулятора чувствительности резистора R11 поступает на диоды VD1 и VD2 типа Д9Б. Протекание небольшого начального тока через эти диоды приводит к увеличению чувствительности детектора. Одновременно это напряжение поступает на базу транзистора VT4 типа КТ315 через диод VD3 типа Д9Б и резистор R14. Базовый ток приводит к открыванию транзистора VT4. На его коллекторе устанавливается потенциал логической единицы.

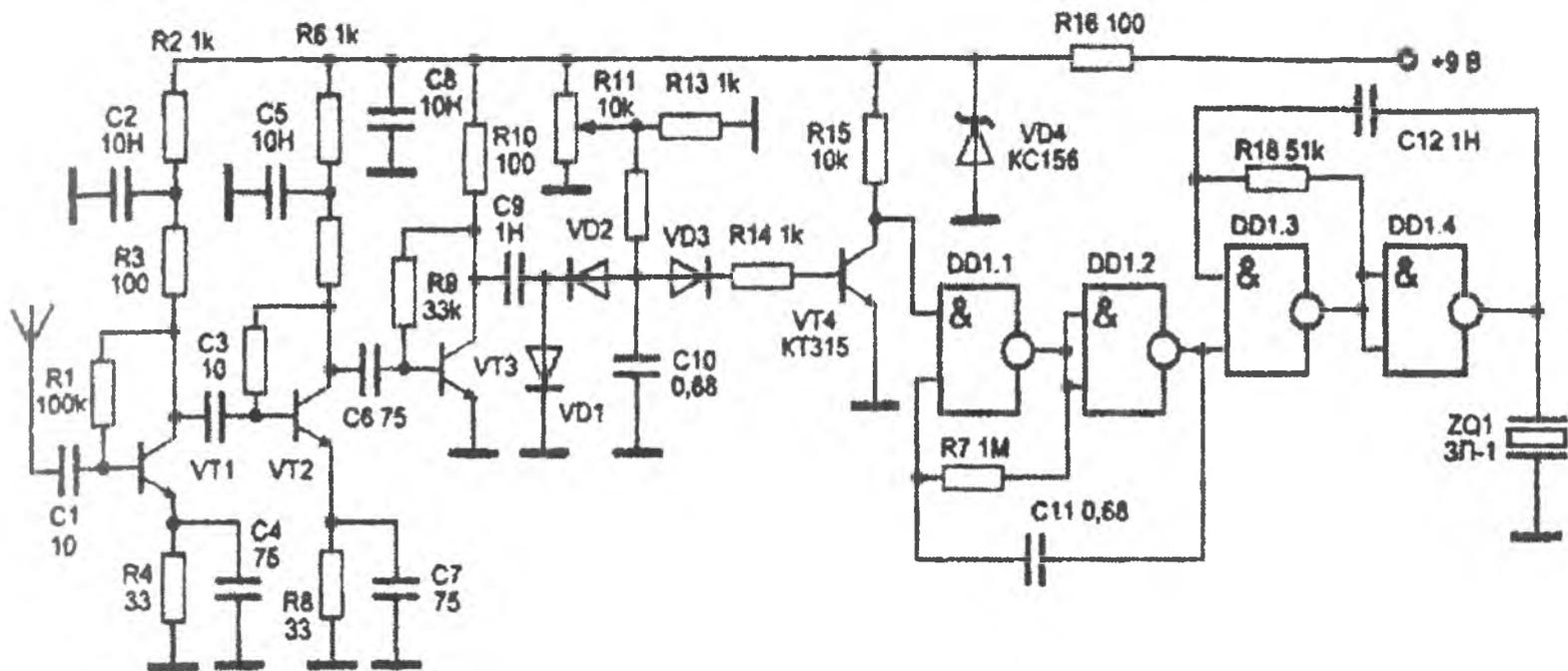


Рис. 2.9. Схема электрическая принципиальная детектора поля со звуковой сигнализацией и регулировкой чувствительности

При увеличении уровня сигнала на входе устройства постоянное напряжение на конденсаторе $C10$ уменьшается. Это ведет к закрыванию транзистора $VT4$. Уровень логической единицы, появляющийся на коллекторе транзистора $VT4$, разрешает работу генератора прямоугольных импульсов на элементах $DD1.1$, $DD1.2$, $R17$ и $C11$. Положительные импульсы частотой около 2 Гц разрешают работу генератора прямоугольных импульсов на элементах $DD1.3$, $DD1.4$, $R18$ и $C12$. С выхода этого генератора прямоугольные импульсы с частотой следования 1,5-2 кГц, промодулированные частотой 2 Гц, поступают на пьезокерамический преобразователь $ZQ1$ типа ЗП-1. Питание устройства осуществляется от параметрического стабилизатора на стабилитроне $VD4$ типа КС156 и резисторе $R16$.

2.3.5.3. Малогабаритный детектор поля с индикацией на двух светодиодах

Данная конструкция отличается малыми габаритами, малым количеством используемых деталей и, вместе с тем, достаточно высокой чувствительностью (рис. 2.10) [163]. В этом детекторе поля использовано новое схемное решение. Хорошо известно, что измерение ВЧ напряжений, меньших 0,5 В, затруднено тем, что уже при переменном напряжении менее 0,2-0,3 В все полупроводниковые диоды становятся неэффективными. Существует, однако, способ измерения малых переменных напряжений с использованием сбалансированного диодно-резистивного моста, позволяющий измерять напряжение менее 20 мВ при равномерной АХЧ до 900 МГц.

Основу данного устройства составляет микросхема $DA1$ типа КР1112ПП2. Эта микросхема включает в себя устройство определения баланса электрического моста с индикацией. Микросхема имеет встроенный источник опорного напряжения.

Сигнал, наводимый в антенне, усиливается широкополосным апериодическим услителем высокой частоты на транзисторе $VT1$ типа КТ3101. Усиленное переменное напряжение высокой частоты через конденсатор $C3$

поступает в диодно-резистивный мост на диодах VD1-VD4 типа ГД507 и резисторах R3-R5. От источника опорного напряжения (вывод 3 микросхемы DA1) через резисторы R3-R5 и диоды VD1-VD4 протекает небольшой (примерно несколько микроампер) прямой ток, который улучшает условия детектирования и увеличивает чувствительности детектора. В выпрямлении измеряемого переменного напряжения участвуют только диоды VD1 и VD2, а два других - VD3, VD4 - образуют соседнее плечо моста, на котором создается начальное напряжение, балансирующее мост, и одновременно служат для его термокомпенсации. Все диоды подобраны с возможно более близкими вольтамперными характеристиками.

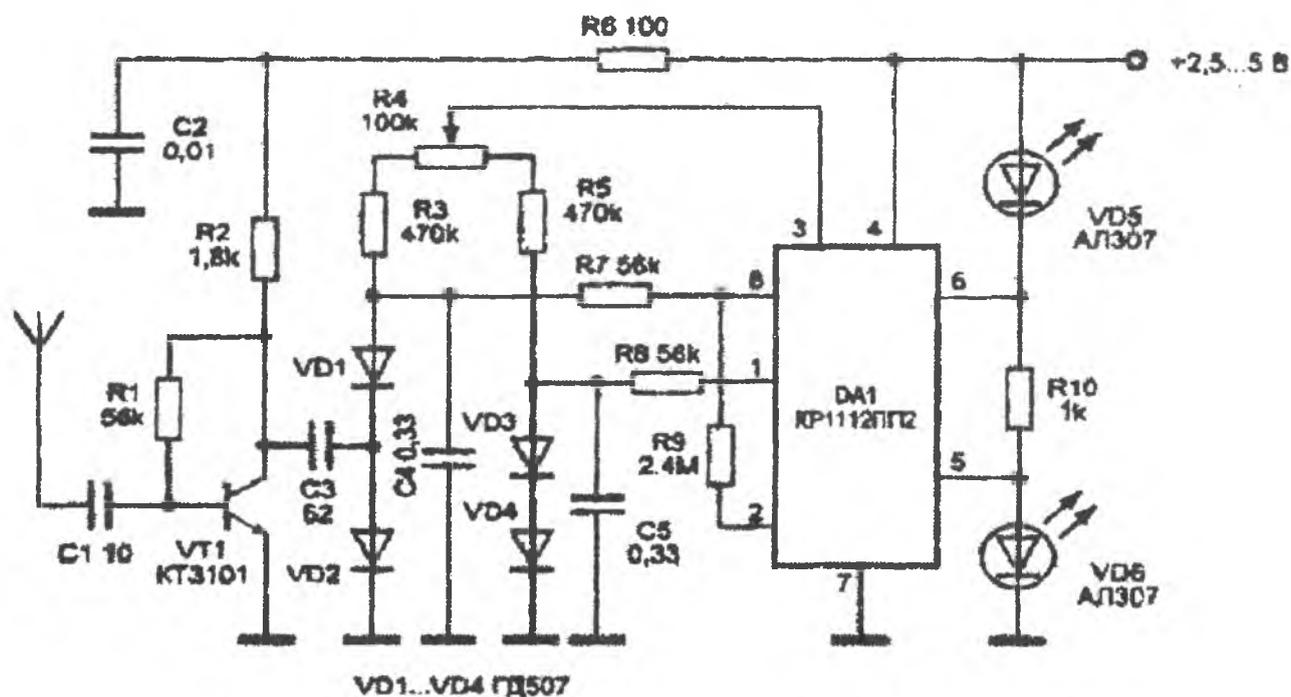


Рис. 2.10. Схема электрическая принципиальная малогабаритного детектора поля с индикацией на двух светодиодах

Конденсатор C4 отфильтровывает переменную составляющую выпрямленного напряжения. Резистор R4 служит для точной балансировки моста. При хорошей балансировке устройство будет реагировать только на напряжение, являющееся результатом выпрямления измеряемого сигнала. Выпрямленное напряжение и напряжение, балансирующее мост, через резисторы R7 и R8 поступают на входы усилителя постоянного тока, расположенного в микросхеме DA1. В зависимости от состояния баланса моста сигнал индикации поступает на один из светодиодов VD5 или VD6 - типа АЛ307. Таким образом, при балансе моста (отсутствие сигнала) включен светодиод VD5, а при наличии сигнала (нарушение баланса моста) - светодиод VD6. В качестве диодов VD1-VD4 можно использовать любые высокочастотные диоды. Светодиоды могут быть любого типа. В качестве источника питания используется источник постоянного тока напряжением 2,5-5 В.

3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭКРАНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

3.1. Экранирование. Основные принципы конструирования экранов

Электромагнитные экраны являются средством ослабления взаимного влияния одних частей устройства на другие; средством защиты различных аппаратов и приборов в целом от воздействия ЭМП, создаваемых посторонними устройствами; средством подавления промышленных помех у источников их возникновения; средством защиты обслуживающего персонала от ЭМИ, создаваемых мощными генераторами. Электромагнитными экранами называют конструкции, предназначенные для ослабления ЭМП [164].

Экранированием называется локализация электромагнитной энергии в определенном пространстве за счет ограничения распространения ее всеми возможными способами.

Из этого определения следует, что в понятие экрана входят как детали механической конструкции, так и электротехнические детали фильтрующих цепей и развязывающих ячеек, ибо только их совместное действие дает необходимый результат.

Паразитная связь между разнесенными источником и приемником напряжения получается в основном по проводам. В таких случаях достаточно включить в них одну или несколько развязывающих ячеек, чтобы получить удовлетворительное экранирование без механических деталей.

Определение необходимости той или иной степени экранирования данной электрической цепи так же, как и определение достаточности того или иного вида экрана почти не поддается техническому расчету, потому что известные теоретические решения отдельных простейших задач оказываются не применимыми к сложным электрическим цепям, состоящим из произвольно расположенных в пространстве элементов, излучающих электромагнитную энергию в самых разнообразных направлениях. Для расчета экрана пришлось бы учитывать влияние всех этих отдельных излучений, что невозможно. Поэтому от конструктора, работающего в этой области, требуется особенно ясное понимание физического действия каждой экранирующей детали, ее относительного значения в комплексе деталей экрана и умение выполнять ориентировочные подсчеты эффективности экрана.

3.1.1. Эффективность экранирования

Эффективностью экранирования (\mathcal{E}) называется отношение напряжений, токов, напряженностей электрического и магнитного полей в экранируемом пространстве при отсутствии и наличии экрана. Количественная оценка эффективности экрана выражается в относительных единицах и определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = U/U_0 = I/I_0 = E/E_0 = H/H_0, \quad (3.1)$$

где E_0 или H_0 – напряженность электрической и магнитной составляющих поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана;

E или H – напряженность электрической и магнитной составляющих поля в этой же точке пространства при наличии экрана.

В технике проводной связи эту величину оценивают в неперах ($Nп$) $V = \ln \mathcal{E} = 0,115 \cdot A$, а в радиотехнике – децибелах (дБ): $A = 20 \lg \mathcal{E} = 8,7 \cdot V$.

3.1.2. Подавление паразитной емкостной связи

Чтобы уменьшить паразитную емкостную связь между отдельными блоками или радиоэлектронными устройствами $C_{\text{пар}}$, изменяют расположение узлов относительно один другого, отдаляют их на максимально возможное расстояние друг от друга, меняют ориентацию; используют в конструкции миниатюрные радиоэлементы. При недостаточности этих мер между элементами устанавливается экран, служащий для экранирования электрического поля (постоянного и переменного). Иногда этот вид экранирования называют электростатическим. Экран вводит в цепь связи блоков A и B дополнительный емкостный делитель, который определяет напряжение на нем (рис. 3.1.).

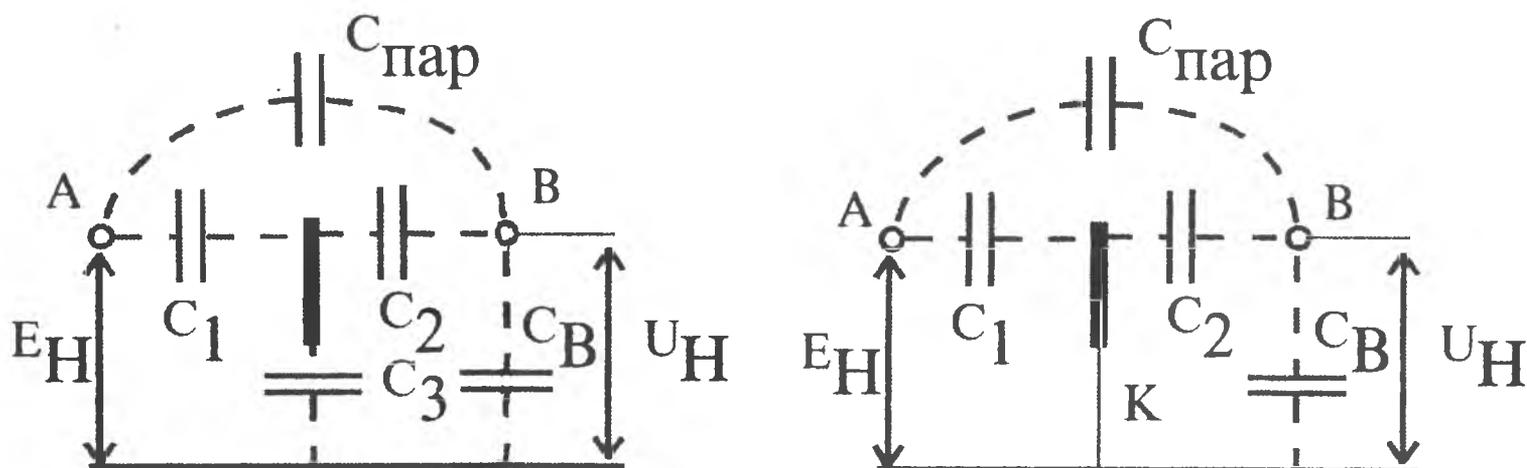


Рис.3.1. Экранирование паразитной емкостной связи

Напряжение в точке В зависит от напряжения на экране и делителя из емкостей C_2 и C_B . Если $C_1 \gg C_3$, то первый делитель почти не действует, напряжение на экране почти равно напряжению в точке А, напряжение в точке В (U_H) после установки экрана возрастает, а экран оказывается вредным. С увеличением емкости C_3 напряжение U_H падает и при $C_3 = \infty$ (что равносильно короткому замыканию между экраном и корпусом) делается равным нулю, если не учитывать остаточную паразитную емкость $C_{\text{пар}}$ между телами. В действительности напряжение в точке В не равно нулю и может быть определено из уравнения

$$U_H = E_H C_{\text{пар}} / C_B. \quad (3.2)$$

3.1.3. Защита от паразитных наводок

Согласно рис.3.1, между точками АК протекает ток, величина которого определяется большим сопротивлением паразитной емкости C_1 . Этот небольшой ток создает незначительный магнитный поток, которым пренебрегают. Также пренебрегают падением напряжения, получающимся на большой поверхности экрана. Важно, чтобы соединение экрана с корпусом было действительно коротким. Здесь соединительные проводники недопустимы. Несколько сантиметров провода могут резко ухудшить экранирование, особенно в диапазонах КВ и УКВ. Эффективность экранирования электрического поля не зависит от толщины экрана. Применимы даже электропроводящие краски. Узкие щели и отверстия в экране не ухудшают экранирования электрического поля, если они малы по сравнению с длиной волны.

При использовании для экранирования металлического листа (крышки), экран может действовать по-разному. Если лист не соединен с корпусом, то такая крышка дает увеличение паразитной связи (ПС). Если лист замкнуть на корпусе, то паразитная емкостная связь уменьшится. Отсюда следует, что присоединенная к корпусу прибора крышка улучшит эффективность экранирования, несмотря на то, что она расположена не между экранируемыми телами. Экранирование может быть довольно эффективным, если лист проходит вблизи от экранируемых точек. В конструкции крышки важно, чтобы надежный контакт с корпусом не нарушался при производстве и эксплуатации. Крышка, плохо соединенная с корпусом, может оказаться причиной отказа в работе устройства.

Особенно тщательно нужно подходить к выбору конструкции крышек, прикрывающих одновременно несколько экранированных отсеков. На ВЧ приходится учитывать индуктивность и сопротивление внутренней поверхности крышки, создающих остаточную паразитную связь. Для устранения ее к крышке

приклепывают пружинные губки, обеспечивающие контакт с промежуточными перегородками почти по всему периметру. Такое решение дорого, сложно, не очень надежно и не полностью устраняет ПС. Лучше делать отдельные крышки, закрывающие каждый отсек или два – три отсека. В этом случае можно обойтись без губок, обеспечивая надежный контакт каждой крышки с корпусом не менее чем в двух точках.

3.1.4. Металлизация

В РЭА всегда имеются металлические части, служащие не для экранирования, а для крепления, предохранения от повреждений, амортизации, силовых приводов и т.д. Случайно размещенные вблизи не соединенные с корпусом металлические детали могут образовать ПС. Поэтому следует обеспечивать надежный контакт с корпусом всех не токонесущих деталей устройства. Съемные детали должны иметь по всему периметру соприкосновения металлическое покрытие, не подверженное коррозии. Несъемные детали следует приваривать или припаивать. ненадежные контакты в системе металлизации могут сами оказаться источниками помех. Особенно сложно осуществить надежное контактное соединение в конструкциях из алюминия и алюминиевых и магниевых сплавов, на которых получается окисная не токопроводящая пленка. Здесь применяют самонарезающиеся винты, лепестки из биметалла, врезающиеся шайбы и пластины, герметизацию мест присоединения компаундом и другие способы. Отсутствие учета свойств алюминия в бытовой РЭА и приборах широкого применения, особенно при креплении корпусов электролитических и проходных конденсаторов приводит к ухудшению параметров и увеличению числа отказов.

3.1.5. Подавление паразитной индуктивной связи

Для уменьшения взаимной индуктивности $M_{\text{пар}}$ можно применить различные способы: изменить расположение связанных цепей при максимальном расстоянии одной от другой, подобрать ориентацию трансформаторов, дросселей и катушек так, чтобы их оси были перпендикулярны, использовать элементы с малым рассеиванием магнитного потока (тороидальные и броневые сердечники из магнитодиэлектриков и ферритов, материалы с высокой магнитной проницаемостью), увеличить полное сопротивление связанных цепей. При недостаточности этих мер производится экранирование магнитного поля.

3.1.6. Экранирование постоянного и медленно изменяющегося магнитного поля

Этот вид экранирования часто называют магнитоэлектростатическим. Экраны изготавливают из ферромагнитных материалов (пермаллоя или стали) с большой относительной магнитной проницаемостью μ_r . Линии магнитной индукции проходят в основном по стенкам такого экрана, которые обладают малым магнитным сопротивлением по сравнению с воздушным пространством внутри экрана. Качество экранирования магнитных полей зависит от магнитной проницаемости экрана и сопротивления магнитопровода, которое будет тем меньше, чем толще экран и чем меньше в нем стыков и швов, идущих поперек направления линий магнитной индукции.

Экран такой конструкции используется редко, только при необходимости подавить наводку на частотах 0 - 1 кГц. В этом диапазоне эффективность экрана от частоты не зависит. Ее можно приближенно определить по уравнению

$$\mathcal{E} = 1 + \mu_r \delta_{\text{экр}}/D, \quad (3.1)$$

где $\delta_{\text{экр}}$ – толщина стенок экрана,

D – диаметр эквивалентного сферического экрана, близкий к длине стенки кубического экрана.

На указанных частотах экран получается громоздким и дорогим. Получить сколько-нибудь удовлетворительную эффективность удастся только при применении специальных материалов с высоким значением μ_r .

3.1.7. Экранирование высокочастотного магнитного поля

В конструкции электромагнитных экранов применяют немагнитные и ферромагнитные металлы. Вихревые токи, наведенные полем источника излучения в теле экрана, вытесняют внешнее поле из пространства, занятого экраном. Токи в экранирующем цилиндре распределяются неравномерно по его сечению, что обусловлено поверхностным эффектом (скин-эффектом). Сущность последнего заключается в том, что переменное магнитное поле ослабляется по мере проникновения в глубь металла, так как внутренние слои экранируются вихревыми токами, циркулирующими в поверхностных слоях.

Из-за поверхностного эффекта плотность тока и напряженность магнитного поля падает по экспоненциальному закону по мере углубления в металл:

$$\frac{\text{Плотность тока на глубине } x}{\text{Плотность тока на поверхности}} = e^{-x/\delta}, \quad (3.4)$$

где $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$ – показатель уменьшения поля и тока, называемый эквивалентной глубиной проникновения.

На глубине $x=\delta$ плотность тока и напряженность магнитного поля падает в e раз, т.е. до величины $\frac{1}{2,72} = 0,37$ от плотности тока и напряженности поля на поверхности.

Экранирующее действие вихревых токов определяется двумя факторами: обратным полем, создаваемым токами, протекающими в экране, и поверхностным эффектом в материале экрана. На высоких частотах, при относительно большой толщине материала экрана $\delta_{\text{экр}} > \delta$ действуют оба фактора и эффективность экрана можно определить по приближенному уравнению:

$$\mathcal{E} \approx e^{\delta_{\text{экр}}/\delta} \left(\frac{1}{2} + \frac{D}{2,8m\mu\delta} \right). \quad (3.5)$$

На низких частотах, когда $\delta_{\text{экр}} < \delta$, поверхностный эффект незначителен, действует только первый фактор и эффективность рассчитывают по уравнению

$$\mathcal{E} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{\omega\mu\sigma D \delta_{\text{экр}}}{2m} \right)^2}. \quad (3.6)$$

В уравнениях приняты следующие обозначения:

$\mu = \mu_0 \mu_r$ – магнитная проницаемость;

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$ Г·см⁻¹ – магнитная постоянная;

μ_r – относительная магнитная проницаемость;

$\delta_{\text{экр}}$ – толщина стенок экрана, см;

D – ширина прямоугольного экрана или диаметр цилиндрического и сферического, см;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота;

f – частота, Гц;

σ – удельная проводимость, См·см⁻¹;

m – коэффициент формы экрана, для прямоугольного $m=2$ и для сферического $m=3$.

На частотах 0,1 - 1 кГц экранирование вихревыми токами действует слабо и магнитное поле можно ослабить только шунтированием его ферромагнитным материалом с большим μ_r . С повышением частоты

увеличивается вытеснение магнитного поля из объема ферромагнитного материала вследствие поверхностного эффекта, уменьшается действующая толщина экрана и эффективность экранирования шунтированием поля падает, а с вытеснением поля растет. В диапазоне звуковых частот 0,1 - 1,0 кГц экранирование магнитного поля является труднейшей задачей и к нему прибегают крайне редко. Предпочитают пользоваться средствами подавления индуктивных ПС, отказываются от использования трансформаторов, что довольно просто достигается в аппаратуре на транзисторах и интегральных схемах. Только в редких случаях применяют многослойные экраны из различных материалов.

На частотах выше 10 кГц всегда можно подобрать материал и его толщину так, чтобы выполнялось неравенство $\delta_{\text{экр}} > \delta$. Это позволяет пользоваться формулой, из которой следует, что ориентировочная эффективность экрана будет

$$\mathcal{E}_{\text{мин}} = e^{\delta_{\text{экр}} / \delta}, \quad (3.7)$$

откуда:

$$B_{\text{мин}} = \delta_{\text{экр}} / \delta. \quad (3.8)$$

На частотах свыше 1 МГц экран из любого металла толщиной 0,5 - 1,5 мм действует весьма эффективно. При выборе толщины и материала экрана в первую очередь следует учитывать не электрические свойства металла, а его механическую прочность, вес, жесткость, а также стойкость против коррозии, удобство стыковки отдельных деталей, осуществления между ними переходных контактов с малым сопротивлением, удобство пайки, сварки и пр. Для частот выше 10 МГц хорошим экраном является медная пленка толщиной около 0,1 мм. Поэтому на этих частотах в конструкции экранов допустимо применение фольгированного гетинакса или другого изоляционного материала с нанесенным на него медным покрытием. Можно также использовать электропроводящие краски и пленки.

Значения эффективной глубины проникновения для стали с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 50$ показывают, что и на ВЧ эффективность стального экрана больше, чем немагнитного. Однако экраны из стали могут вносить значительные потери в экранируемые цепи вследствие большого значения ρ и явления гистерезиса. Поэтому их применяют только в случаях, когда с вносимыми потерями можно не считаться.

При правильно выбранных размерах и материале магнитного экрана рассчитанное значение \mathcal{E} почти всегда оказывается больше необходимого. При этом действительная эффективность зависит исключительно от конструкции и

качества выполнения экрана. Коэффициент индуктивной ПС пропорционален $M_{\text{пар}}$. Очевидно, что подобно подавлению емкостной ПС после экранирования магнитного поля остаточная индуктивная ПС пропорциональна $M'_{\text{пар}}$. Учитывая, что все другие величины не изменяются, получаем

$$\mathcal{E} = M_{\text{пар}} / M'_{\text{пар}} \quad (3.1)$$

3.1.8. Одновременное экранирование электрического и магнитного полей

Конструкции экранов в этом случае аналогичны предыдущим, но действуют они по-разному. Токи, протекающие по экрану под влиянием магнитного поля, значительно превосходят токи, наблюдаемые при экранировании электрического поля. Причиной этого является то, что токи, возбуждаемые в экране магнитным полем, протекают в короткозамкнутом поверхностном слое тела самого экрана, сопротивление которого невелико, в то время как в цепь тока, протекающего при экранировании электрического поля, всегда включено большое сопротивление паразитной емкости между экранируемым телом и экраном.

Эффективность электрического экрана почти целиком определяется наличием короткого замыкания между экраном и корпусом прибора. При экранировании магнитного поля присоединение экрана к корпусу не изменяет величину возбуждаемых в экране токов и, следовательно, на эффективность магнитного экранирования не влияет, если стыки отдельных частей экрана не снижают эти токи.

Изменение частоты мало влияет на действие электрического экрана. Точно так же незначительно влияет удельная проводимость материала, из которого он сделан. Магнитное экранирование целиком зависит от частоты. Чем она ниже, тем слабее действует магнитный экран, тем большей толщины приходится его делать для достижения одной и той же эффективности.

При работе на ВЧ, когда $\delta_{\text{экр}} \gg \delta$, экран ведет себя почти как идеальный проводник, проводимость которого $\sigma = \infty$.

При конструировании экранов необходимо знать следующие свойства идеального проводника:

1. Внутри идеального проводника не могут существовать переменные электрические и магнитные поля, поверхность проводника является эквипотенциальной.

2. Токи протекают только по поверхности пластины из идеального проводника, несмотря на наличие, более короткого пути.

3. Ток, протекающий по проводу, пропущенному через отверстие в пластине из идеального проводника, возбуждает в пластине поверхностные токи

такой силы и направления, что сумма токов, протекающих через поперечное сечение отверстия, будет равна нулю.

4. В экране с перегородками возникают блуждающие токи, охватывающие всю поверхность экрана; при сближении точек присоединения к экрану растут токи, протекающие по более коротким путям, и уменьшаются все остальные. Присоединение к дополнительным точкам не освобождает экран от блуждающих токов; только присоединение цепи к крайним точкам на выступах экрана позволяет избавиться от этих токов, но при условии, что отсутствуют паразитные емкости между экраном и цепью.

5. Суммарный магнитный поток через отверстие в пластине из идеального проводника равен нулю; малые отверстия почти не ухудшают качество экрана, так как магнитное поле, выходящее из отверстия, можно обнаружить только вблизи него, а паразитная емкость, связывающая через электрическое поле экранируемые друг от друга точки, почти не зависит от наличия таких отверстий.

Длинные узкие щели, допустимые в электрическом экране, опасны в магнитном, если они направлены поперек направления вихревых токов. Когда экранируют сложные электрические цепи, в которых направления магнитных потоков могут быть самыми разнообразными, следует избегать длинных щелей. Желательно крышки и экраны соединять друг с другом и с корпусом прибора так, чтобы длина щелей не превосходила $0,01 - 0,001$ длины волны. Это важно и для экранирования поля, так как от качества контакта между частями экрана, определяющего разность потенциалов между ними, почти целиком зависит эффективность электрического экрана.

3.1.9. Экранирование электромагнитного излучения

При подавлении ЭМИ используются такие особенности распространения волн, как поглощение электромагнитной энергии в материале и отражение электромагнитной волны от границы раздела двух сред. Поглощение может быть обусловлено электромеханическими, электротепловыми, электрохимическими, фотоэлектрическими и другими преобразованиями поля в материале экрана, а отражение - в основном несоответствием электромагнитных свойств сопрягаемых сред. При распространении ЭМИ на границе раздела сред, характеризующихся различными свойствами (например, различное волновое сопротивление в металле и в воздухе), электромагнитная энергия частично проходит через нее, продолжая распространяться в новой среде, и частично отражается, причем коэффициент отражения зависит от соотношения волновых сопротивлений экрана и воздуха.

Электрические и магнитные свойства любой среды, в которой распространяется электромагнитное излучение, могут быть описаны с помощью

комплексных параметров μ и ϵ [165]. В общем случае для анизотропных гиротропных сред эти величины являются тензорными комплексными величинами, зависящими от напряженности поля (для ферромагнетиков $\mu = \mu(H)$, для сегнетоэлектриков $\epsilon = \epsilon(E)$, а при описании анизотропных сред тензор магнитной проницаемости имеет размерность 3×3). Для однородного пространства по отношению к плоской волне вводят характеристическое сопротивление Z , равное отношению амплитуд напряженности электрической и магнитной составляющих поля

$$Z = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\epsilon\epsilon_0}}. \quad (3.10)$$

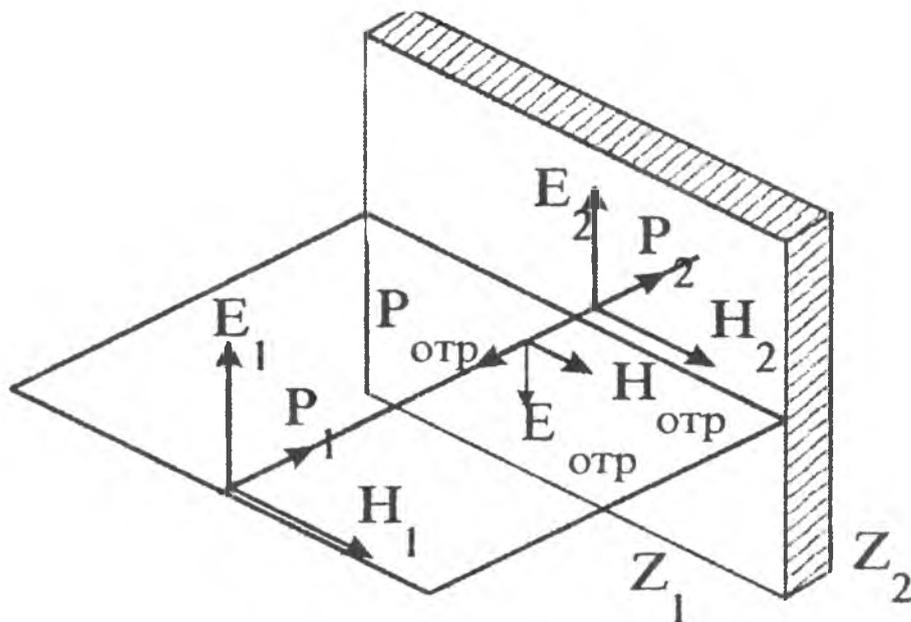


Рис.3.2. Случай нормального падения плоскополяризованной электромагнитной волны на границу раздела двух сред

Для свободного пространства $Z_0 = 120 \cdot \pi$ Ом. Используя рассуждения, приведенные в [20] для случая нормального падения волны на бесконечную плоскость, разделяющую две различные однородные бесконечно протяженные среды (рис. 3.2), и выражения для коэффициента отражения, можно сделать вывод, что энергия отраженной волны тем больше, чем больше разность волновых сопротивлений сред:

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (3.11)$$

где Z_1 и Z_2 – характеристическое сопротивление первой и второй сред соответственно.

Рассмотрение процесса распространения ЭМИ в поглощающей среде можно значительно упростить, если использовать запись уравнений Максвелла

для гармонических колебаний [166]. Поглощающая среда характеризуется комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостью $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ и $\mu = \mu' - j\mu''$. В этом случае интегральные уравнения Максвелла можно свести к волновым уравнениям Гельмгольца:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \\ \nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

где k – комплексное волновое число, определяемое как

$$k = k' - jk'' = 2\pi f \sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0} = \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\epsilon\mu}, \quad (3.13)$$

где $c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме,

$j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Решение уравнений (3.12) представляется в виде

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{E}_m e^{-k''x} e^{j(2\pi ft - k'x)}, \\ \vec{H} = \vec{H}_m e^{-k''x} e^{j(2\pi ft - k'x)}, \end{cases} \quad (3.14)$$

где t – время,

x – координата, вдоль которой распространяется волна.

Коэффициент k'' имеет физический смысл коэффициента затухания.

Распределение поля в среде представлено на рис. 3.3.

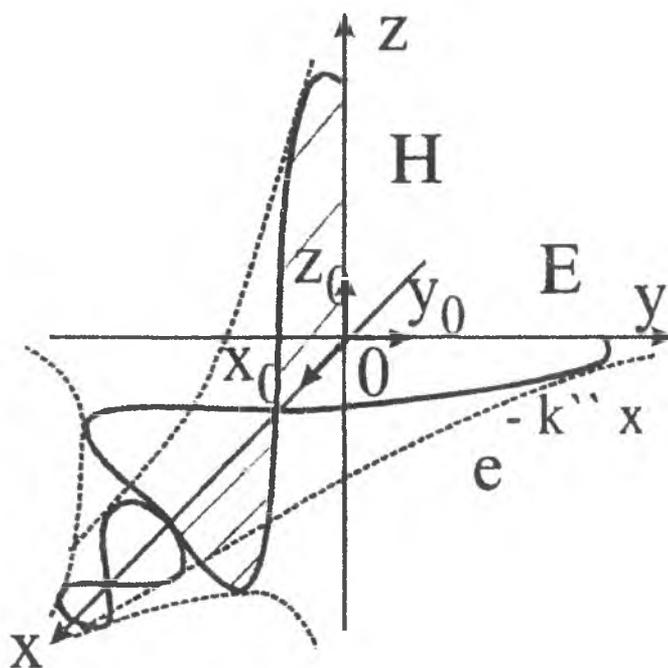


Рис. 3.3. Затухающая электромагнитная волна в среде с потерями

Экранирование происходит благодаря отражению электромагнитной волны от металлической поверхности экрана и затуханию преломленной волны в теле экрана. Пусть у падающей плоской волны P_1 векторы электрического E_1 и

магнитного H_1 полей параллельны плоскости экрана. В точке I, находящейся на границе сред воздух-металл, волна P_1 частично отразится (волна $P_{отр}$) и частично преломится (волна P_2). Распространяясь в металлической среде, преломленная волна P_2 затухает по экспоненциальному закону и к моменту достижения следующей границы раздела сред типа металл-воздух напряженности обеих полей будут в $e^{\delta_{экр}/\delta}$ раз меньше, чем в точке на поверхности экрана. На выходе волны из экрана снова произойдет преломление и отражение от границы сред металл-воздух. Преломленная волна P_2 выйдет в экранируемое пространство, а отраженная $P_{отр}$ будет затухать и в точке на внешней поверхности экрана напряженности полей будут в $e^{2\delta_{экр}/\delta}$ раз меньше, чем на входе в экран. Затем будут происходить отражения от границ раздела сред до полного затухания волны в металле. В экранируемое пространство будут проникать преломленные волны P_2 и т.д. Их суммарное воздействие определяет напряженности полей E и H в этом пространстве. Экранирование электромагнитного излучения может представлять интерес на частотах выше 10 МГц, на которых $\delta_{экр} > 2\delta$, при толщине любых применяемых материалов $\delta_{экр} > 0,1$ мм. Взяв минимальное соотношение $\delta_{экр} = 2\delta$, получим, что напряженность поля волны, претерпевшей двукратное отражение, будет в $e^4 = 55$ раз меньше, чем волны, прошедшей через экран. Можно считать, что из всех волн в экранируемое пространство проникает только волна P_2 , допускаемая при этом ошибка не превосходит 2 % . Отсюда следует, что

$$\mathcal{E} \approx E_{пад}/E_2 = H_{пад}/H_2 = e^{\delta_{экр}/\delta} Z_{с\text{ возд}}/4Z_{с\text{ мет}}, \quad (3.14)$$

где $Z_{с\text{ возд}} = 377$ Ом – характеристическое сопротивление вакуума (воздуха);

$Z_{с\text{ мет}} = \sqrt{\omega\mu/\sigma}$ – модуль характеристического сопротивления металла, который в сотни и тысячи раз меньше характеристического сопротивления воздуха. Входящее в формулу отношение $4Z_{с\text{ мет}}/Z_{с\text{ возд}}$ является приближенным значением произведения коэффициентов преломления на границах сред: воздух-металл и металл-воздух.

Большая отражательная способность металлов в ряде случаев может оказаться нежелательной. Поэтому в зависимости от практической целесообразности материалы для экранирования изготавливаются либо с большим (металлические листы, сетки), либо с малым коэффициентом отражения (различные радиопоглощающие материалы).

В тех случаях, когда имеются только паразитные излучения волн (утечки из щелей в линиях передачи СВЧ энергии, из катодных выводов магнетрона и т.п.) и отражения от стенок экранирующего устройства не оказывают влияния на технологический процесс и режим работы излучателя, экранирование может быть сделано без поглощающих покрытий.

Если же производственный процесс основан на непосредственном излучении энергии в пространство (например, при испытании антенных устройств), полное или частичное экранирование источника металлическими экранами может привести к нарушению технологического процесса (изменение режима работы, пробой генераторных ламп передатчиков, изменение рабочей частоты передающих устройств и т.д.). Кроме того, большая отражательная способность металлических экранов для экранирования помещения может привести к увеличению интенсивности поля в рабочей зоне. В подобных случаях рационально использовать поглощающие экраны и покрытия.

Выделяют несколько механизмов поглощения ЭМИ в диэлектрике: потери на электропроводность; релаксационные потери, обусловленные инерционностью поляризации; резонансные, когда частота ЭМП приближается к частотам собственных колебаний электронов и ионов и из-за неоднородности материала [167]. Общая мощность, поглощаемая в объеме V , равна

$$\bar{P}_\Pi = \frac{2\pi f}{2} \int_V (\epsilon_0 \epsilon'' \dot{\mathbf{E}}_m \dot{\mathbf{E}}_m^* + \mu_0 \mu'' \dot{\mathbf{H}}_m \dot{\mathbf{H}}_m^*) dV. \quad (3.16)$$

Из формулы (3.16) можно сделать вывод, что увеличения мощности потерь можно добиться за счет повышения мнимых составляющих ϵ'' и μ'' диэлектрической и магнитной проницаемости, причем потери в материале возрастают с увеличением частоты f . Другим путем увеличения поглощаемой мощности является увеличение объема, по которому производится интегрирование.

Таким образом, реальными путями повышения эффективности поглощающих материалов является увеличение толщины покрытия и подбор специальных сред со специфическими электромагнитными характеристиками (абсолютной диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостью, удельной проводимостью σ) по толщине материала.

4.1. Основные материалы для экранов электромагнитного излучения

В электромагнитном поле СВЧ некоторые свойства материалов существенно изменяются. За счет поверхностного эффекта уменьшается проводимость металлов и сплавов; за счет явления поляризации изменяется диэлектрическая проницаемость и увеличиваются потери в диэлектриках; за счет гиромагнитного эффекта изменяется магнитная проницаемость ферритов.

Металлические материалы на СВЧ используются в качестве токопроводящих поверхностей, линий передачи, объемных резонаторов, интегральных микросхем и т.д. Поверхностный эффект – уменьшение плотности тока СВЧ в направлении от поверхности внутрь проводника по экспоненциальному закону – определяется глубиной проникновения δ (толщиной поверхностного слоя, в котором плотность тока уменьшается в $e \cong 2,72$ раза). Глубина проникновения зависит от длины волны СВЧ поля в свободном пространстве λ_0 , относительной магнитной проницаемости μ_r и удельной проводимости σ :

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \cong 0,029 \sqrt{\frac{\lambda_0}{\mu_r \sigma}}, \quad (4.1)$$

где f – частота ЭМИ.

С ростом частоты тока, магнитной проницаемости и проводимости металла возрастает поверхностный эффект; при этом ток протекает вблизи поверхности проводника, что вызывает увеличение активного сопротивления. Потери энергии СВЧ определяются величиной удельного активного поверхностного сопротивления: $\rho = 1/\delta\sigma$. Значения σ характерных материалов приведены в табл. 4.1.

Проводимость зависит не только от физических свойств материала, но и от вида обработки токонесущей поверхности. При выборе способа обработки токонесущей поверхности следует учитывать, что после чистовой механической обработки образуется поверхностный слой толщиной до десятков микрон с размельченными до 0,001 - 0,01 мкм зернами металла. Такой слой будет иметь меньшее электрическое сопротивление, чем шлифованный или полированный слой металла толщиной не более 0,1 мкм, но с частицами полированной пасты и абразива. Поэтому полирование токонесущей поверхности не всегда приводит к уменьшению потерь, особенно в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн. В этом случае необходимо удалять поверхностный слой химическим или электрохимическим путем.

Диэлектрические материалы широко используются в качестве заполнителей различных линий передачи, герметизирующих и согласующих вставок, антенных обтекателей, покрытий, поглотителей мощности и т.д. Их диэлектрические и

магнитные свойства полностью определяются величинами комплексной диэлектрической и магнитной проницаемостей.

Таблица 4.1

Удельные проводимости металлов и сплавов при постоянном токе при 293 К

| Материал | $\sigma, \times 10^7 \text{ См/м}$ | Материал | $\sigma, \times 10^7 \text{ См/м}$ |
|--------------------|------------------------------------|------------------|------------------------------------|
| Серебро (100 %) | 6,17 | Бронза фосфатная | 0,82 – 2,52 |
| Медь (100%) | 5,97 | Вольфрам | 1,78 |
| Серебро (10 % Cu) | 4,96 | Тантал | 1,55 |
| Золото | 4,10 | Никель | 1,28 |
| Алюминий (100 %) | 3,54 | Платина | 0,91 |
| Латунь отожженная: | | Родий | 0,66 |
| 90 % Cu | 2,52 | Олово | 0,65 |
| 80 % Cu | 1,88 | Свинец | 0,45 |
| 70 % Cu | 1,65 | Ртуть | 0,10 |
| 60 % Cu | 1,51 | | |
| Хром | 2,23 | Нихром | 0,10 |
| Магний (100 %) | 2,18 | Титан | 0,22 |
| Цинк | 1,7 | Цирконий | 0,23 |
| Магниеые сплавы | 0,56 – 1 | Инвар | 0,14 |
| Молибден | 2,1 | Графит | 0,013 |

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = |\varepsilon|e^{j\delta_e}; \mu = \mu' - j\mu'' = |\mu|e^{j\delta_m}. \quad (4.2)$$

Качество материала определяется тангенсом угла электрических потерь $\text{tg}\delta_e = \varepsilon''/\varepsilon'$ и магнитных $\text{tg}\delta_m = \mu''/\mu'$. Если $\delta_e = \delta_m = 0$, то среда – без потерь (идеализированная).

Диэлектрическая проницаемость вакуума $\varepsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$, магнитная $\mu_0 \cong 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}$. При практических расчетах пользуются относительными значениями $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ и $\mu_r = \mu/\mu_0$. При этом вещественные части ε_r и μ_r характеризуют плотности электрической и магнитной энергии, а мнимые – электрические и магнитные потери.

В табл. 4.2 и 4.3 приведены свойства твердых диэлектриков с $\varepsilon_r \leq 6$ и пенопластов с $\varepsilon_r \leq 2$. Для миниатюризации различных устройств СВЧ (волноводы, полосковые устройства и т.д.) их заполняют пластмассами с наполнением титановыми соединениями, имеющими высокое значение ε_r . Тракты СВЧ могут заполняться газообразными веществами (табл. 4.4).

При создании различного рода устройств СВЧ: резонансных вентилях (однонаправленные линии передачи), фазовращателей, циркуляторов, переменных аттенюаторов (ослабителей), модуляторов, переключателей, ограничителей мощности, направленных ответвителей, настраиваемых резонаторов, излучателей антенн и т.д. используются ферриты. Ферриты – твердый, хрупкий материал с механическими свойствами, близкими к керамике. По химическому составу ферриты СВЧ можно

разделить на группы: никелевые, магниевые, магниевые ферроалюминаты; никелевые и магниевые феррохромиты, иттриевые ферриты – гранаты.

Таблица 4.2

Параметры основных твердых диэлектрических материалов $\Theta=293$ К ($f=10^6$ Гц)

| Материал | ρ_e^v , Ом·см | ϵ_r | $Tg\delta_e \cdot 10^{-4}$ | D, г/см ³ | Θ_m , К | $\alpha, K^{-1} \times$ $\times 10^{-4}$ |
|--|-----------------------|------------------|----------------------------|-------------------------|----------------|---|
| Полиэтилен | | | | | | |
| ПЭВД (ГОСТ 16337-70) | 10^{17} | 2,3 | 3 | 0,93 | 358 | 5,5 |
| ПЭНД (ГОСТ 1638-70) | 10^{17} | 2,1 | 5 | 0,96 | 358 | 5,5 |
| ПЭСД | - | 2,4 | 4 | 0,96 | 358 | - |
| Полипропилен (МРТУ6-05-1105-67) | 10^{16} | 2,2 | 5 | 0,9 | - | 1,1 |
| Полистирол блочный (ГОСТ 9440-60) | 10^{14} | 2,6 | 4 | 1,06 | 348 | 0,8 |
| Ударопрочный полистирол (ТУ6-05-1604-72) | 10^{15} | 2,7 | 7 | 1,06 | 358 | - |
| Сополимер стирола (САМ) МРТУ6-05-828-68 | 10^{16} | 2,6 | 5 | 1,1 | - | 0,8 |
| Фторопласт-4 (ГОСТ 10007-72) | 10^{17} | 2,2 ¹ | 1 ¹ | 2,1 | 383 | 1,2 |
| Фторопласт-4Д (ГОСТ 14906-69) | 10^{16} | 2,2 | 3 | 2,2 | - | - |

Таблица 4.3

Параметры некоторых вспененных диэлектриков

| Материал | D, кг/см ³ | $\sigma_p^{мх}$, Мпа | α , $K^{-1} \times 10^{-5}$ | Θ_m , К | E_e , кВ/мм | ϵ_r | $tg\delta_e \times 10^{-4}$ |
|----------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------------|----------------|------------------|--------------|-----------------------------|
| ПТ-3 | 1,1 | 30 | 7 | 353 | 35 | 2,8 | 7 |
| ПТ-5 | 1,6 | 30 | 5 | 353 | 27 | 5,0 | 8 |
| ПТ-7 | 1,8 | 28 | 4 | 358 | 20 | 7,0 | 9 |
| ПТ-10 | 2,1 | 24 | 3 | 358 | 15 | 10,0 | 12 |
| ПТ-16 | 2,6 | 18 | 2 | 363 | 10 | 16,0 | 20 |

Таблица 4.4

Значения ϵ_r для газообразных веществ при $\Theta = 273$ К, $p = 10^5$ Па (~ 76 мм рт. ст)

| Вещество | Водород | Кислород | Воздух, свободный от углекислого газа | Азот | Углекислый газ |
|--------------|----------|----------|---|----------|----------------|
| ϵ_r | 1,000264 | 1,000530 | 1,000574 | 1,000589 | 1,000988 |

К основным параметрам ферритов СВЧ относятся: ширина линии ферромагнитного резонанса $2\Delta H$ [А/м], намагниченность при насыщении I^{nc} [Тл], относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta_e$, точка Кюри Θ_k [К]. Кроме того, ферриты характеризуются параметрами: магнитной индукцией B [Тл]; остаточной магнитной индукцией B_r [Тл]; коэрцитивной силой по магнитной индукции H_c [А/м]; относительной магнитной проницаемостью μ_r ; плотностью D [кг/м³] и удельным электрическим сопротивлением ρ_e^V [Ом·м].

Никелевые ферриты используются в основном в диапазонах милли- и сантиметровых волн; имеют большие значения намагниченности при насыщении и высокую термостабильность. Их недостаток – высокие значения начальных потерь.

Магниевые ферриты используют в основном в средней части сантиметрового диапазона; обладают малыми магнитными и диэлектрическими потерями, высоким коэффициентом прямоугольности, но меньшей термостабильностью по сравнению с ферритами из никеля. Максимальной намагниченностью при насыщении обладают ферриты марки ЗСЧ6 и ЗСЧ9.

Магниевые ферроалюминаты и феррохромиты используют в длинноволновой части диапазона СВЧ. Они характеризуются малыми значениями индукции при насыщении. Основным их недостатком является низкая термостабильность.

4.2. Композиционные радиопоглощающие материалы и покрытия

Помимо РПП, использующих конструктивные и геометрические особенности, существуют поглотители, обеспечивающие более эффективное поглощение ЭМИ за счет свойств самих материалов. Обычно это материалы со значениями тангенсов углов диэлектрических и магнитных потерь больших 1, что позволяет уменьшить общую толщину РПП. Поэтому при создании РПМ большое распространение получили композитные материалы, состоящие из частиц порошкового металлического или металлоподобного материала с определенной проводимостью и магнитными свойствами, которые разделены прослойками из диэлектрической фазы. Наиболее перспективным направлением является использование гетерогенных двух и более компонентных материалов, но влияние микроструктуры, химического и фазового состава компонентов на электрофизические свойства синтезированных материалов еще практически не изучено.

В порошковых РПМ максимального поглощения добиваются при наличии металлической фазы (никель, хром, ниобий, железо, аустенитная сталь) около 40-55 % масс. Отмечается, что при увеличении концентрации металла происходит увеличение коэффициента отражения.

Исследовались образцы композиционных материалов следующих типов: металлический алюминий- Al_2O_3 и железо-парафин. Обнаружено, что возможны варианты параметров материалов с содержанием металлической фазы (рис. 4.1), но для уменьшения отражения необходимо, чтобы металлические частицы были разделены диэлектриком.

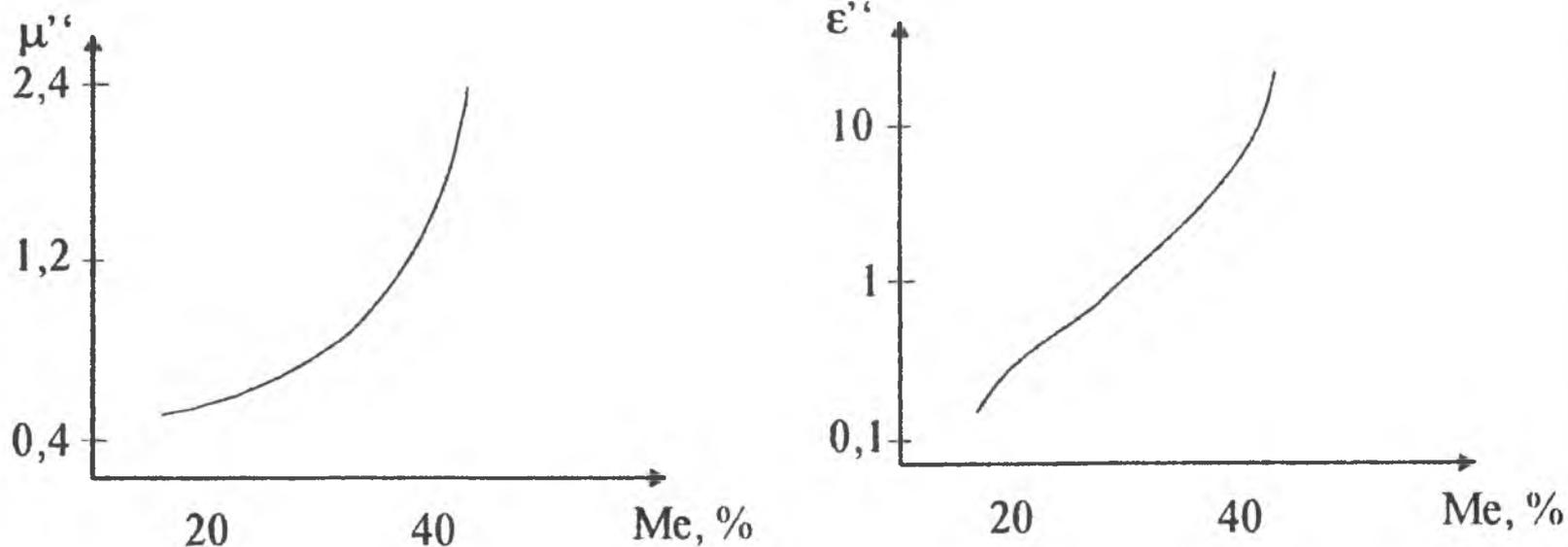


Рис. 4.1. Зависимость электрофизических параметров композиционных материалов металл-диэлектрик в системе железо-парафин от концентрации металлической фазы

Следует учитывать изменение проводящих свойств материалов при нагреве, который возникает при поглощении энергии радиоволн, поэтому не рекомендуется использовать в качестве диэлектриков окислы ванадия (III), (IV) и титана (III), так как они при нагревании могут вести себя как обычный металл.

В случае материалов на основе мелкодисперсных смесей, когда длина волны много больше размеров частиц, среда выступает как однородная изотропная, свойства которой можно оценивать интегральными параметрами:

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{V} \int_V \epsilon dV = \sum_{i=1}^n (\theta_i \epsilon_i), \quad (4.3)$$

где θ_i , ϵ_i – объемное содержание и диэлектрическая проницаемость i -й компоненты.

Для композиционных материалов используют формулу:

$$\sqrt[3]{\bar{\epsilon}} = \sum_{i=1}^n (\theta_i \sqrt[3]{\epsilon_i}), \quad (4.4)$$

а для пенокерамических – формулу Лихтенекера:

$$\ln \bar{\epsilon} = \sum_{i=1}^n (\theta_i \ln \epsilon_i). \quad (4.5)$$

Однако все эти формулы не учитывают влияния внутренней структуры композита на его диэлектрические свойства.

Существует несколько способов получения композиционных материалов:

1. Спекание смеси порошков, приводящее к синтезу металлокерамики или керметов. В качестве керамической составляющей выступают неорганические соединения – оксиды, карбиды, нитриды, бориды, силициды, стекла.
2. Смешение неорганической части со смолами, пластмассами, парафинами.

Диэлектрические свойства полученного композита в основном определяются характеристиками связующего и зависят от характера химической связи, поляризуемости ионов и упругих постоянных решетки (табл. 4.5).

Требуемые значения ϵ могут быть получены комбинациями соединений в виде твердых растворов, механических смесей.

При получении металлокерамики применяются технологии порошковой металлургии, включающие подготовку порошков (дробление и измельчение), уплотнение (прессование, формование) и термическую обработку (спекание), жидкофазное спекание и пропитку пористого тугоплавкого окисного каркаса жидкой металлической связкой.

В [168] предложено изготавливать композитный материал, содержащий микрочастицы диаметром 1 – 500 мкм. Он изготавливается из серебра, никеля, меди, железа, палладия, кобальта, хрома, марганца, кадмия, титана, цинка и их сплавов. Диэлектрическая прослойка обеспечивается продуктами реакции этих элементов с H, P, As, Cl, S, Se, Te, I, B или их смесями. Материал, полученный из частиц, покрытых 10 % масс. серебра и отожженных после смеси с серой, закрепляемых в стекле или керамике в рабочем диапазоне частот 5 – 20 ГГц обеспечивает ослабление отраженного сигнала на –20 дБ по сравнению с алюминиевой пластиной.

Таблица 4.5

Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от типа связующего

| Диапазон значений ϵ | $\epsilon \leq 10$ | $\epsilon = 10-300$ | $\epsilon > 500$ |
|------------------------------|--|---|---|
| Тип связи | Ионная или ковалентная связь | Ионно-ковалентный характер связей | Доменная структура и ионно-ковалентный тип связей |
| Типы соединений | Силикаты, алюмосиликаты, окислы элементов II и III групп | Силикаты, алюмосиликаты, окислы элементов IV-VI групп | Сложные оксиды перовскитовой структуры |
| Примеры | MgO, корунд Al_2O_3 , цельзиан $(BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2)$, шпинель $MgAl_2O_4$ и т.д. | Рутил TiO_2 , $MgTiO_3$, $CaTiO_3$, $CrTiO_3$, $Pb_2Nb_2O_7$ | $BaTiO_3$, $PbTiO_3$ и т.д. |

Подавление отраженной волны может быть произведено с помощью ультра легкого композиционного материала [169], который является не воспламеняющимся за счет использования углеродных волокон (углеродистого графита) и синтетического связующего. Рабочий диапазон частот составляет 30-1000 МГц.

Воздействие ЭМИ может стать причиной сбоя или выхода из строя высокочувствительного оборудования. Электромагнитный экран, изготовленный на основе термоустойчивого композиционного материала, позволяет устранить это явление [170]. Выполняется путем прессования, вспенивания композиции или ее экструдирования в различные структуры. Композиционный материал представляет собой комбинацию проводящего металлического слоя (25-40 %), стекловолокна (4-8 %)

и угольного порошка (3-10 %), связующим является термопластичный полимер. В качестве металлического слоя используется один из следующих металлов: Ag, Al, Ni, Cu. Эффективность экранирования такого экрана достигает порядка 50 дБ в частотном диапазоне 0,5-1000 МГц.

Многослойный поглотитель для решения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) различных радиоэлектронных средств описан в работе [171]. Первый слой представляет собой композиционный материал с распределенными в нем ферромагнитными Mn-Zn частицами размером 1-50 мкм (рис. 4.2). Вторым следует термопроводящий слой, выполненный из нитрида алюминия, нитрида бора, кремниевого нитрида или карбида. Третий слой аналогичен первому. Такой материал позволяет достигнуть значения ослабления 20 дБ в частотном диапазоне 10-1000 МГц.

В целях защиты от ЭМИ корпус бытовых приборов, средств связи и различного рода радиоэлектронных устройств может быть покрыт поглощающим материалом, рассматриваемым в работе [172]. В качестве поглотителя предлагается использовать покрытие, состоящее из 50 % многоанилина ($C_6H_5NH_2$), который является электропроводным полимером, и 50 % добавок (отвердитель, растворитель и т.д.).



Рис. 4.2. Схема многослойного поглотителя

4.2.1. Композиционные радиопоглощающие материалы и покрытия в технологии Stealth

Радиолокационная маскировка применяется для ограничения и искажения информационных сигналов, излучаемых радиолокационной станцией. Ее цели – увеличение пространственной, структурной, частотной, временной, поляризационной и энергетической скрытности [173]. Для этого применяются активные и пассивные электромагнитные помехи [174, 175].

Создание новых образцов вооружения с малой величиной заметности для различных устройств обнаружения, которые основываются на технологиях Stealth [176], направленных на уменьшение отражающих характеристик конструкций объекта [177] методом изменения наружной архитектуры поверхности (минимум отражающих геометрических форм его поверхности) и использование РПМ для обеспечения минимального уровня отраженного электромагнитного сигнала.

ЭПР определяется соотношением мощностей тестирующего сигнала и отраженного в обратном направлении.

Формирование архитектуры защищаемого объекта, основано на методах коротковолновой асимптотики (методы физической и геометрической теории дифракции) [178, 179, 180].

Технологии Stealth также основаны на специальной технологии посадки на объект РПП и конструкционных элементов из РПМ [181], наиболее перспективным по эксплуатационным параметрам, из которых выполняются полимерные композиты.

Для элементов конструкций (корпусов подвижных объектов) обычно используют теплостойкие стекло- и углепластики на полиимидных, полиамидных связующих (различные смолы и клеи) [182, 183] которые составляют 50 % всей массы самолета типа АТР (США), крыло изготавливают из термопластика с графитовым наполнителем [184, 185]. Полимеры в составе композиционных РПМ и РПП в качестве связующего материала снижает массу изделия, упрощают сборку.

Для снижения потерь СВЧ энергии в полимер вводят диэлектрические, электропроводящие, магнитные и комбинированные наполнители (электропроводящие порошкообразные материалы различной геометрической формой частиц, волокна, нити, пластинки, сетки сложной формы, решетки, резонансные элементы, ткани, пленки, ферриты, оксиды, карбиды и сульфиды металлов, карбид кремния, сегнетокерамику, хитин и т.п.). Для повышения диапазона частот применяют смешанные наполнители.

Представляется перспективным использование облегченных полимеров из соединений азометина (оснований Шиффа), способных поглощать СВЧ излучения [186, 187].

В последнее время большое внимание исследователей направлено на создание хиральных сред [188] (металлические или керамические спирали или металлические частицы сложной формы хаотично распределенные в изотропном диэлектрике).

По геометрическим рельефам: слоистые РПМ плоской или другой формы профилированной поверхности [189, 190]. Используют поверхность в виде пирамид, отверстий [191, 192].

Разрабатываемая система управляемого рассеяния электромагнитных волн (целенаправленное изменение различных радиолокационных показателей объекта во времени и пространстве) [193]. Это связано с работой по созданию РПМ, создание которые могут изменять свои электродинамические параметры под действием внешних управляющих сигналов. К числу таких РПМ можно отнести электропроводящие полимеры [194].

Может использоваться пористый облегченный материал. Он может быть получен нанесением на пористую керамическую матрицу угля в количестве, не превышающем 2,7 % масс [195]. Керамика изготавливается из природных минералов таким образом, что в толщине материала оказываются вкрапленными области искусственного материала, который выжигается для создания пор. После этого матрицу отжигают в гидрокарбонатной атмосфере с восстановителем, благодаря чему формируется угольное покрытие.

Три механизма потерь (магнитные, диэлектрические и потери на проводимость) реализованы в одном материале смешиванием проводящего угольного и

магнитного ферритового порошка в пропорциях, согласно диаграмме, представленной на рис. 4.3 [196].

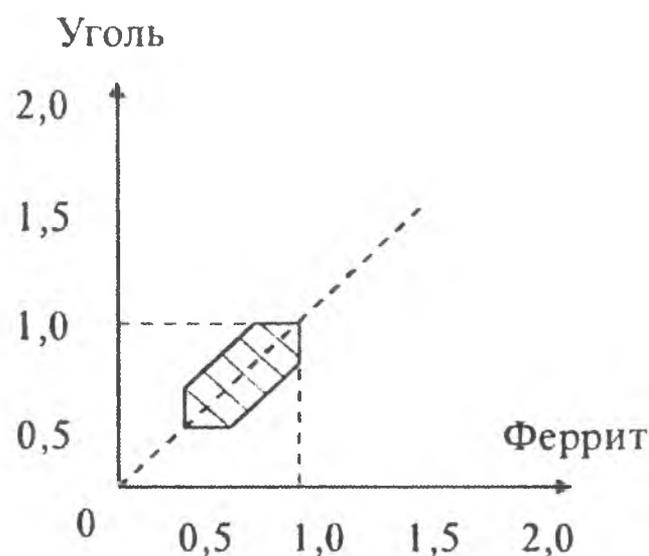


Рис. 4.3. Диаграмма удельного содержания компонентов в композите

Наилучшие результаты по уменьшению отраженного от плоской металлической поверхности электромагнитного излучения получены при толщине нанесенного покрытия 1,5 мм. Уровень коэффициента отражения -20 дБ и ниже обеспечивается в диапазоне частот от 8,7 до 9,6 ГГц. При этом использовали Mn-Zn феррит с магнитной проницаемостью 2700 в соотношении с углем 1:0,8:0,8.

Интересным представляется применение следующего состава порошкового композиционного материала [197]: 59-79 % масс. Fe_2O_3 , 3-8 % масс. NiO, 15-25 % масс. ZnO, 3-8 % масс. CuO смешиваются с водой, 0,5-1,0 % пластификатора, в качестве которого используется ПВА, 0,2-0,6 % диспергирующего агента, 0,0005-0,0004 % оксида мышьяка и 0,1-0,4 % связующего. После чего смесь распыляют с одновременной сушкой и формируют частицы размером 1-3 мкм, которые потом спекаются под давлением 800-1200 кг/см².

Композитный РПМ, эффективно работающий в диапазоне частот от 8 до 16 ГГц, был получен с использованием неорганических волокон из карбида кремния, получаемых отжигом высокомолекулярных органосиликоновых волокон при температурах 1300-1500°C [198]. От температуры отжига зависит удельное сопротивление полученного материала, которое варьируется от 10 до 10^4 Ом см. Полученные волокна могут быть изготовлены в виде тканого полотна, мата, композита с синтетическими смолами (термопластичные материалы - нейлон, PPS), керамикой (карбиды, нитриды, алюмосиликаты) или закреплены между листами керамики и резины.

4.2.2. Экранирующие композиционные материалы в технике СВЧ

Проблемы электромагнитной совместимости и безопасности радиотехнических систем имеют глобальный характер. В ряде случаев электромагнитная совместимость объектов и элементов СВЧ техники достигается путем их рассеяния по частоте, времени и расстоянию. Однако чаще всего такие технические решения малоэффективны и практически трудно осуществимы.

Радикальным средством снижения уровня переизлучений и помех, предотвращения утечек СВЧ энергии являются экранирующие материалы.

В 1996 г. рынок полимерных и металлических материалов, экранирующих электромагнитные излучения, составил 422 и 283 млн. долларов. И к 2001 г. возрастет до 542 и 316 млн., долларов, соответственно [199]. Использование металлических экранов для защиты высокочувствительной радиоаппаратуры признано низкотехнологичным, энергоемким и малопродуктивным [200]. Поэтому спрос на полимерные экранирующие материалы существенно выше, чем на металлические. По прогнозам он будет увеличиваться ежегодно на 51 %, а для металлов эта цифра составит 2,2 %.

Наиболее перспективный способ экранирования СВЧ излучений основан на применении полимерных композиционных РПМ [201]. Широкая номенклатура подобных материалов предназначена для различных сфер технического приложения.

Композиционные радиогерметизирующие уплотнители и СВЧ абсорберы предотвращают утечку электромагнитной энергии из рабочих объемов радиоэлектронной аппаратуры, обеспечивая помехоустойчивость. Они служат также для защиты от СВЧ излучения операторов РЛС, радиофизических приборов и другого радиотехнического оборудования, пользователей ЭВМ, бытовых микроволновых печей, сотовых телефонов и т.п. [202, 203].

Композиционные РПМ являются эффективным средством борьбы с паразитной интерференцией радиоволн, переотраженных от соседних объектов. Это нежелательное явление («ложное» эхо) создает помехи работе навигационных, метеорологических, военных РЛС и спутниковых систем связи [204].

Кроме того, РПМ нашли применение в качестве функциональных элементов СВЧ устройств: конечных нагрузок и аттенюаторов в волноводных и коаксиальных линиях; радиопоглощающих нагрузок зеркальных антенн, задающих требуемый закон распределения отражаемого сигнала по апертуре; элементов антенных обтекателей и переключателей и т.п. [205]. Новая область использования экранирующих РПМ - защита средств электронной обработки и передачи информации от несанкционированного доступа [206].

Наиболее высокие требования предъявляются к экранирующим и облицовочным РПМ безэховых камер [207]. В безэховых камерах проводятся почти все виды испытаний радиотехнических систем: измерения параметров антенн и характеристик рассеяния радиолокационных целей; исследования показателей чувствительности и электромагнитной совместимости радиоэлектронных блоков, юстировка пеленгационной аппаратуры и т.п. РПМ должен создать и некотором объеме камеры (безэховой зоне) условия, приближающиеся к условиям «свободного пространства». Для выполнения точных, прецизионных измерений безэховую зону необходимо практически полностью освободить от естественных и искусственных радио- и электронных помех. Этого достигают оптимизацией формы и размеров камеры и повышением качества РПМ.

Физические, рецептурные и технологические принципы создания экранирующих полимерных композиционных РПМ аналогичны выше описанным для материалов, применяемых в технологиях Stealth.

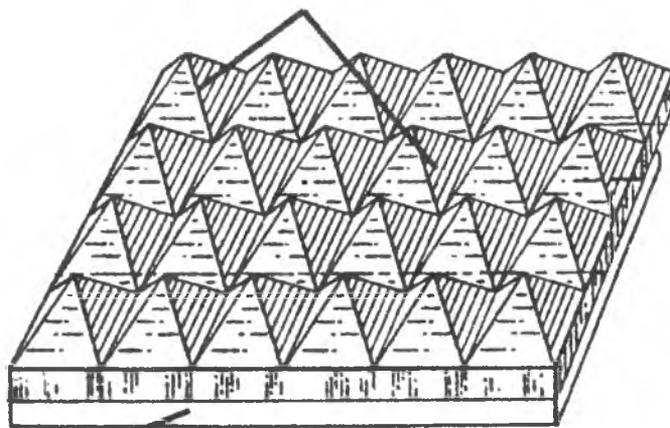
Необходимо отметить, что для крупногабаритных экранов - стен, блоков, облицовок корпусных объектов и безэховых камер часто применяют трехмерные конфигурационные РПМ на основе пенополимеров (пенополиуретана, пенополистирола, пенополиэфиров и др.). Такие РПМ имеют шиповидную, пирамидальную, конусоидальную конфигурацию поверхности либо содержат смонтированные шиповидные вставки, а также ячеистые полости в форме сот, цилиндров или «шахт» [208]. Для работы при больших плотностях потока мощности (более 1 Вт/см^2) пригодны устойчивые к тепловым нагрузкам РПМ градиентного типа с добавками антипиренов и шиповидные материалы со скругленными вершинами.

Кроме высоких радиотехнических характеристик экранирующие РПМ должны удовлетворять требованиям конструкционной надежности, экологической безопасности и промышленной эстетики.

В качестве радиопоглощающих материалов диапазона СВЧ могут использоваться также композиты, наполнителями которых служат диэлектрические резонаторы СВЧ, выполненные из параэлектриков (например, твердый раствор $\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3$). В диапазоне диэлектрического резонанса такие композиты являются искусственными магнитными материалами, обладающими значительными магнитными потерями ($\mu''=1-6$).

Широкополосный поглотитель СВЧ диапазона выполнен в виде листа магнитного керамического материала, имеющего общую формулу MOFe_2O_3 , в котором Fe_2O_3 присутствует в количестве приблизительно 65 и 80 % по весу (рис. 4.4). В формуле MO – оксид металла, содержащий окись никеля (3-12 %) и окись цинка (15-25 %), включая оксид марганца (0-10 %), окись кальция (0-2 %) и окись магния (0-2 %). Толщина листа такого материала достигает значения четверти длины волны. Он может быть использован как подложка для более сложной конструкции поглотителя. Например, на этой основе закрепляют пирамидальный поглощающий материал, это позволяет уменьшить коэффициент отражения волны и расширить его рабочий диапазон который составляет от 50 МГц до 1 ГГц. Расширение частотного диапазона достигается так же за счет использования смешанных ферритов [209].

Пирамидальный поглощающий материал



Магнитный керамический материал

Рис. 4.4. Схема магнитного керамического поглотителя СВЧ энергии

Подложкой для СВЧ поглотителя, описанного в работе [210], служит материал слабо поглощающий ЭМИ. На ней формируют поглощающий слой из смеси металлического оксида и непроводящего материала. Предлагается использовать оксиды

Zn, Mn, Co, или смесей из двух и более оксидов, что позволяет сделать поглотитель широкополосным по частотной и температурной шкале. С помощью такой конструкции достигается коэффициент отражения в пределах 10 дБ.

Материал для поглощения СВЧ излучения [211] представляет собой сочетание звеньев двадцатигранной полярной молекулы с разнообразным набором матриц или с полимерами, что придает высокую степень ориентационной подвижности элементам звеньев, для поглощения СВЧ излучения. В качестве элементов могут быть использованы полярные карбораны (орто- и мета-карборан) с электроотрицательными или электроположительными заместителями.

Для экранирования корпусов радиоэлектронной аппаратуры широкополосный поглотитель ЭМИ можно выполнить на основе композиционных материалов [212]. Он изготовлен в виде матрицы и представляет собой смесь полимерных связующих, проводящих порошков и волокон, которые могут быть экструдированы в различные структуры. Рабочий диапазон частот для этого материала составляет от 30 МГц до 110 ГГц.

Для создания безэховых комнат и камер (рис. 4.5) могут быть использованы многослойные радиопоглощающие материалы (РПМ). Первый слой является проводящим, следующий слой выполнен из диэлектрического материала, на котором закреплены ферритовые пластины [213]. Такая конструкция эффективно поглощает ЭМИ в диапазоне частот от 30 МГц до 1 ГГц. Толщина ферритового слоя составляет 7,5 мм, диэлектрического – 25 мм. Ферритовые пластины размещаются на слое диэлектрика не перекрывая один другого. В рабочем диапазоне частот такая конструкция обеспечивает эффективность экранирования на уровне свыше 70 дБ. Существенный недостаток РПМ пирамидальной формы – их высота, которая для указанного частотного диапазона составит 3-3,5 метра, что значительно уменьшает свободное внутреннее пространство внутри камеры, необходимое для проведения измерений. Использование ферритовых пластин исключает этот недостаток.

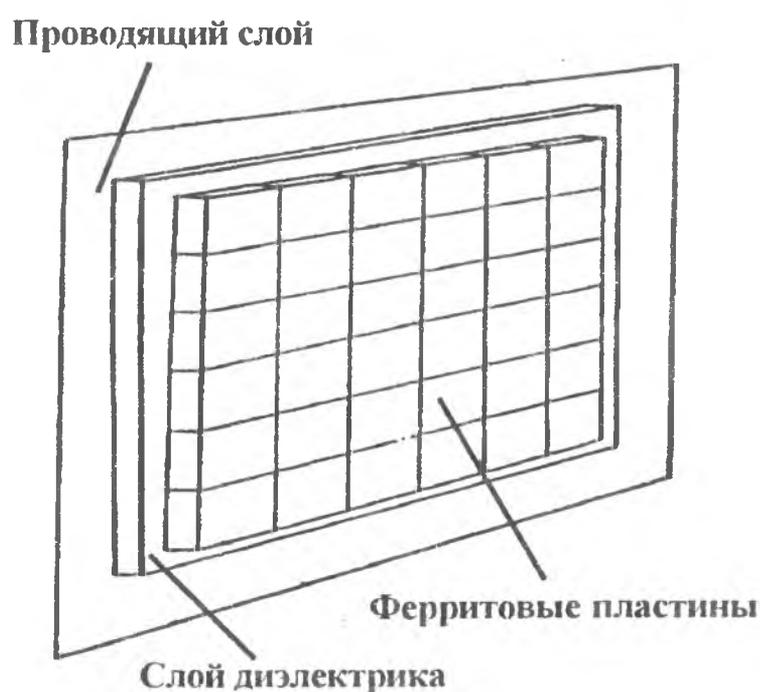


Рис. 4.5. Схема многослойного поглотителя для безэховой камеры

Для безэховых камер используется также другая широкополосная конструкция поглотителя ЭМИ [214]. На проводящей основе закрепляются пирамиды,

расположенные параллельно и состоящие из множества отдельных ферромагнитных элементов, которые составлены начиная с элемента с большим диаметром к элементу с меньшим диаметром. Формируемый методом спекания NiZn феррит, используемый в данной конструкции, имеет магнитную проницаемость 2,2 и толщину 6,5 мм. Рабочий диапазон частот данного РПМ 30-3000 МГц (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Схема широкополосного поглотителя ЭМИ

Применение высокообъемных поглотителей приводит к снижению внутреннего объема безэховых камер (рис. 4.7). Поэтому приоритетными остаются низкообъемные, но высокоэффективные и широкополосные конструкции РПМ [215]. Основу такого материала составляет проводящая пластина, на которой крепятся чередующиеся слои диэлектрика, вносящие диэлектрические потери, увеличивающиеся от верхнего слоя к нижнему.

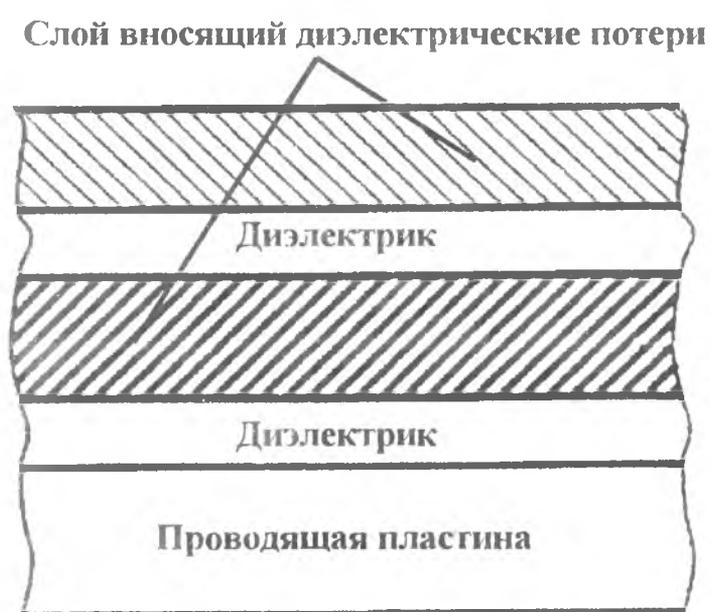


Рис. 4.7. Схема многослойного поглотителя ЭМИ

Широкополосный поглотитель для безэховых камер предложен в работе [216]. На проводящей подложке фиксируется конструкция псевдопирамидального типа, выполненная из NiZn феррита или из ферритового порошка, закрепленного в связующем материале, в качестве которого может быть использован хлоропреновый каучук, полиолефин или подобный пластичный материал. Эффективность экранирования такой конструкции составляет 20 дБ в диапазоне частот 30-1000 МГц (рис. 4.8).

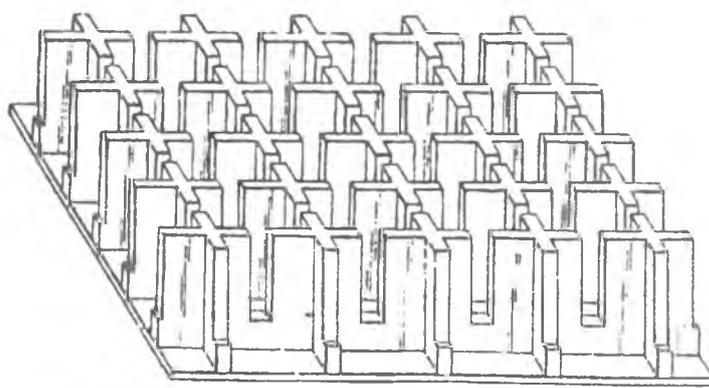


Рис. 4.8. Схема широкополосного поглотителя

РПМ, описанный в работе [217], так же применяется в безэховых камерах. Первым слоем является NiZn феррит толщиной 1,5-2 мм (рис. 4.9). Второй слой выполнен из аналогичного материала толщиной 4-4,5 мм. Между слоями создан воздушный зазор 20-25 мм за счет установленных распорок-соединителей.



Рис. 4.9. Схема поглотителя ЭМИ

4.3. Диэлектрические радиопоглощающие материалы

Под диэлектрическими поглотителями понимают обычные диэлектрики с невысокой диэлектрической проницаемостью ϵ' , обладающие большими потерями ϵ'' за счет релаксационной дисперсии или добавок проводящей фазы. Согласование такого поглотителя со свободным пространством осуществляется выбором резонансной (четвертьволновой) толщины или использованием плавно-неоднородных и ступенчато-неоднородных по толщине сред [218].

Простейшим поглотителем СВЧ, особенно миллиметровых волн, является обычная вода. В сантиметровом диапазоне ее ϵ' в результате релаксационной дисперсии снижается с 81 до 2, а ϵ'' имеет максимум. Воду можно использовать в связанном состоянии, вводя ее в пористые и гигроскопичные материалы [219]. На короткое время объект может быть защищен парами воды.

Сходный способ защиты объекта предложен в [220]: на поверхность наносят радиоактивный материал (например, Sr^{90}), ионизирующий окружающий воздух. Возникающая плазма служит широкополосным поглотителем электромагнитных волн.

Вместо воды могут быть использованы шиффовы основания, обладающие большими потерями в диапазоне СВЧ.

Наибольшее применение в диэлектрических поглотителях нашли композиционные материалы, содержащие полимерное связующее и проводящий наполнитель. В качестве последнего применяют графит, сажу, фуллерены, металлы, оксиды металлов, полупроводники. Меняя соотношение компонентов, можно получать заданные значения ϵ' и ϵ'' , обеспечивающие оптимальное согласование. Такие материалы описаны в упомянутых обзорах.

В последнее время в поглотителях СВЧ используют проводящие ткани, волокна, нити с полимерным связующим. В частности, предлагается использовать волокна карбида кремния для диапазона 8-16 ГГц [221].

Широкополосный поглощающий материал состоит из хаотично уложенных полимерных нитей с резистивным покрытием, параметры которого варьируются по экспоненциальному закону по толщине покрытия. Благодаря плавному изменению ϵ' и ϵ'' обеспечивается повышенная широкополосность [222].

В [223] запатентованы не отражающие покрытия с использованием хиральных материалов и структур в СВЧ и оптическом диапазонах, а в [224] предложено поглощающее устройство диапазона 10 МГц-100 ГГц, содержащее поглощающий диэлектрический материал и хиральные элементы в нем.

Основой для поглотителя, представленного в работе [225], служат короткие полупроводящие керамические волокна. Оптимальные параметры волокон следующие: диаметр волокна 0,1-10 мкм, коэффициент сжатия 10-300 и объемное удельное сопротивление 0,5-20 Ом·см. Использование коротких керамических волокон позволяет уменьшить массу и коэффициент отражения в отличие от металлополимерных волокон.

Поглотители пирамидальной формы на основе вспененного полиуретана являются высокоэффективными, однако обладают рядом недостатков. Полиуретан, как связующий материал, не термостоек, поэтому использование такого материала для поглощения электромагнитных волн радиочастотного диапазона связано с определенным риском (поглощение электромагнитной волны большой мощности, может вызвать чрезмерный его разогрев и возгорание). Полиуретан легко абсорбирует влагу, и со временем его свойства изменяются. Эти недостатки могут быть устранены за счет использования углеродного не тканого волокна, герметизированного неорганическим связующим веществом [226]. Неорганический связующий материал имеет относительно высокий коэффициент теплопроводности, является негорючим и высокообъемным веществом, легко охлаждаемым.

Радиопоглощающий материал, описанный в работе [227], выполнен из негорючего материала и обладает способностью эффективно поглощать электромагнитную и акустическую волну. Составными его частями являются поглотитель и основа. Поглотитель представляет собой соединенные в пирамиду негорючие панели, материалом для которых является углеродосодержащее неорганическое волокно или органическая пена. Основа сделана из аналогичной негорючей панели и представляет собой поглотитель электромагнитной волны (ЭМВ) с гофрированной поверхностью. Все панели соединяются между собой методом склеивания (рис. 4.10).

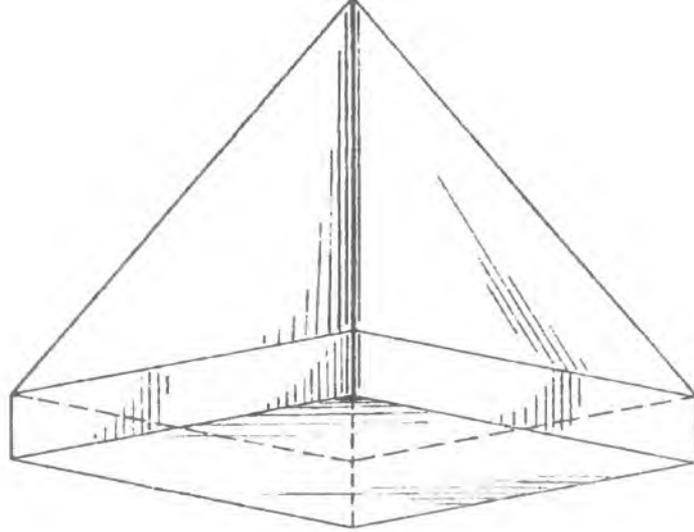


Рис. 4.10. Схема негорючего поглотителя ЭМИ

Перспективной представляется конструкция экрана ЭМИ, представляющего собой набор слоев из неоднородных поглотителей [228]. Один слой поглотителя выполнен в виде композиции аэрогеля и диэлектрика. Плотность и пористость каждого из слоев увеличивается по мере увеличения толщины слоя, таким образом, диэлектрические свойства данного материала варьируются от свойств воздуха до свойств диэлектрика (рис. 4.11).

| |
|--|
| $\epsilon' = 1.072$ AND $\epsilon'' = 0.175$ |
| $\epsilon' = 1.231$ AND $\epsilon'' = 0.621$ |
| $\epsilon' = 1.414$ AND $\epsilon'' = 1.236$ |
| $\epsilon' = 1.625$ AND $\epsilon'' = 2.085$ |
| $\epsilon' = 1.866$ AND $\epsilon'' = 3.257$ |

Рис. 4.11. Схема композиционного поглотителя

Для снижения радиолокационной заметности используется поглотитель, описанный в работе [229]. В данной конструкции в диэлектрическом связующем, которым является продукт спонтанной полимеризации акриламида в присутствии кристаллогидратов нитратов металлов из ряда Ca(II), Cr(III), Bi(III), UO₂(II), Er(III), Zn(II), Ni(II), равномерно распределены стеклосферы и электропроводящие волокна. Приведено мольное соотношение акриламид/нитрат металла и количество стеклосфер микронного размера.

Конструкция РПМ, представленная в работе [230], может эффективно использоваться в безэховой камере. За вторым слоем находится отражатель, который может быть выполнен из латуни, Fe, Cu, Ni. Конструкция данного РПМ модульная и имеет соответствующие срезы для удобного крепления к стенам безэховой камеры. Рабочий диапазон частот составляет 0,05-2 ГГц с декрементом затухания -20 дБ. Магнитная проницаемость феррита, используемого в данной конструкции, составляет 1000-2000 на частоте 10 МГц. поглотителя является проводящей, на ней закреплены ферритовые стержни, с квадратной или шестигранной формой сечения. Выполнен

феррит путем прессования Ni-Zn или Mn-Mg-Zn порошка (70-85 %) со связующим веществом. Каждый из стержней имеет толщину 0,5-2,5 мм, расстояние между ними находится в пределах 10-50 мм. Пространство между стержнями заполняется вспененным или водным неорганическим составом, который содержит, например, графит или углерод (рис. 4.12).

Важным параметром РПМ, предназначенных для использования в безэховой камере, является низкий коэффициент отражения в диапазоне частот 30-150 МГц (рис. 4.13). Для решения данной задачи использовалась пена полиуретана, легированная углеродом. Форма поглотителя пирамидальная со скрученной геометрией. Высота ее достигает 2,2 м. Закреплена на многослойной подложке с толщиной первого слоя 0,3 м, второго слоя 0,08 м [231].



Рис. 4.12. Схема поглотителя ЭМИ на основе ферритовых стержней

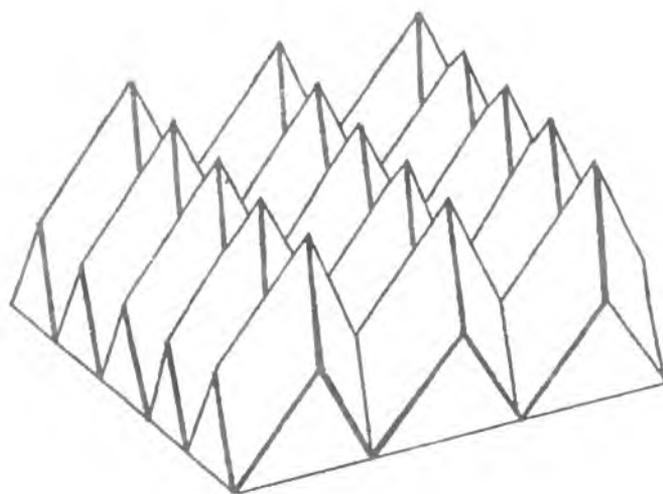


Рис. 4.13. Схема поглотителя с низким коэффициентом отражения

Сверхширокодиапазонный РПМ, представленный в работе [232] может быть применен для создания поглотителей электромагнитных волн, используемых при оснащении многофункциональных безэховых камер и экранированных помещений. Он представляет собой конструкцию, состоящую из диэлектрического материала, на основе радиопоглощающего пеностекла, магнитного материала из радиопоглощающего никель-цинкового феррита, которые закреплены на металлической подложке. По техническим характеристикам это является сверхширокодиапазонным, малогабаритным, негорючим и экологически чистым.

Принципиальным недостатком поглотителей диэлектрического типа является их большая толщина и относительно небольшая полоса частот согласования.

4.4. Магнитные поглощающие материалы

Как показано выше, радиопоглощающие материалы должны быть магнитодиэлектриками. Наличие магнитной компоненты поглощения μ'' позволяет улучшить согласование, расширить полосу рабочих частот, повысить затухание и уменьшить толщину защищающего покрытия.

В качестве магнитных материалов применяют ферриты различных составов, порошки карбонильного железа и никеля. Связующим служат клеи, смолы, пластмассы, каучуки.

Использование магнитных материалов в диапазоне СВЧ осложняется магнитной дисперсией, в результате которой магнитная проницаемость μ' снижается с сотен и тысяч на низких частотах до 1 в сантиметровом диапазоне [233]. В сантиметровом диапазоне μ' снижается до значений, меньших 1. Магнитные потери остаются достаточно большими до 10 ГГц. Чем ниже низкочастотные значения μ' , тем выше частота дисперсии. Поэтому в диапазоне СВЧ более высокие μ' наблюдаются в составах с более низкой проницаемостью на низких частотах.

Измерения ϵ' , ϵ'' , μ' , μ'' ферритов разных составов (никель-цинкового, кобальт-цинкового, кобальтового, бариевого, стронциевого), а также карбонильного железа в миллиметровом диапазоне проведены в [234]. Максимальные значения μ'' составляет ~2.5. Недавно измерены значения μ' и μ'' ряда СВЧ - ферритов (Y - гранаты, Li, Mg, Ni-ферриты и др.) в диапазоне 1 МГц-25 ГГц [235]. Гексагональные ферриты применяются в поглотителях СВЧ [236].

Имеется множество патентов на конкретные составы ферритов для поглотителей различных диапазонов. Так, для диапазона 3 ГГц предлагаются ферриты со структурой шпинели системы Ni-Co-Zn-Si-Fe-O [237]. Запатентована серия поглощающих материалов со структурой шпинели с общей формулой MFe_2O_4 , где $Me=Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mg$ и т.д [238]. Материалы предназначены для диапазона 0.5-12 ГГц. Размер частиц порошка ферритов, эффективно поглощающих СВЧ излучение, на частотах 0.5-1.5 ГГц составляет 1.65-0.7 мкм, а в диапазоне 2.5-12.0 ГГц - 0.1 мкм и меньше.

Японскими исследователями предложен ферритовый поглотитель состава $(1-y)Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot yFe_2O_3 \cdot xSiO_2$ с $0 < y < 1$, $1 \leq x \leq 15$ [239]. Изучены Ni-Zn-Cu-ферриты с добавками $MnCO_3$ (130-540 МГц), а также с добавкой PbO и CoO (1000-1800 МГц). В [240] заявлены тонкие ферритовые поглотители систем $Mn-Zn-Fe-O$, $Ni-Zn-Fe-O$ и $Cu-Zn-Fe-O$.

Достоинством чисто ферритовых поглотителей является их малая толщина (несколько миллиметров). Однако они нетехнологичны, так как приходится наклеивать ферритовые пластинки на защищаемую металлическую поверхность. Кроме того, у таких поглотителей недостаточно широкая полоса рабочих частот. Вторым недостатком может быть устранен использованием в покрытии ферритовых пластинок разных составов с различными резонансными частотами ферритов [241]. Могут использоваться

пластинки из двух или более спеченных вместе ферритов с разными частотными характеристиками [242].

При исследовании магнитодиэлектрических покрытий [243] было обнаружено наличие двух частот согласования, одна из которых связана с магнитным резонансом в феррите (<4 ГГц), а вторая - с толщенным резонансом (до 7.5 ГГц при толщине 3.7 мм). Использование двугорбой резонансной кривой позволяет существенно расширить полосу рабочих частот. Таких же результатов удастся добиться при использовании ферритов двух составов, нанесенных слоями или в виде смеси.

Многослойные широкополосные поглотители изготавливаются с использованием магнитных материалов [244]. Например, поглотитель для УКВ – СВЧ - диапазона содержит проводящую пленку, слой магнитного материала (смесь ферритового порошка с его содержанием более 70 мас. % м резины) толщиной 3-50 мм и ткань из металлических нитей [245].

Широкополосный поглотитель имеет следующую конструкцию: на металлическую отражающую поверхность наносится слой диэлектрика с низкой ϵ , затем слой феррита (например, Ni-Zn с магнитной проницаемостью $\mu_1=2500$), потом опять слой диэлектрика с малой ϵ толщиной 15 мм, а затем магнитный слой с низкой μ (Mn-Zn феррит с $\mu_2=10.5$). При этом должно выполняться следующее соотношение между μ_1 и μ_2 : $\mu_1 > 25\mu_2$. Такой поглотитель обеспечивает высокое поглощение (23 дБ) в диапазоне 30-300 МГц [246].

Поглотитель электромагнитных волн, в котором с целью возможности управления полосой частот поглощения взяты два слоя ферритов разных составов (Ni-Zn и Mn-Zn) разной толщины, разработан в США [247]. Центр частоты поглощения смещается в зависимости от соотношения компонентов поглотителя в диапазоне 50-1400 МГц.

Электромагнитный поглотитель [248] содержит в качестве матрицы выступает обычный феррит (например, Ni-Zn феррит), а между его зернами находится стеклофаза, состоящая из шпинели CuO-Fe₂O₃ (содержание CuO – 40-60 мол. %).

Трехслойный радиопоглощающий материал содержит слой проводящего материала, слой оксидного магнитного материала со связующим в качестве матрицы и слой, содержащий частицы металлического и магнитного материала в матрице из связующего [249].

Широкое применение получили РПМ на основе ферритового порошка, закрепленного в связующем [250]. Изготавливали РПМ смешиванием ферритового порошка с органическим высокомолекулярным связующим [251]. Частицы порошка измельчались до размеров, меньших 1,65 мкм, и смешивались со связующим в пропорции: 0,2-0,9 объемных частей феррита и 0,8-0,1 частей органического соединения. Предложенный материал поглощал электромагнитные излучения в диапазоне 0,5-12 ГГц, причем резонансная частота здесь зависит от размера частиц (табл. 4.6, 4.7).

Для получения ферритового порошка использовались материалы с общей формулой MeFe₂O₄, где в качестве Me могут выступать Mn, Ni, Cu, Zn, Mg, Co и т.д. Широко применяется Mn-Zn феррит смешением 724 г Fe₂O₃, 175 г MnO и 101 г ZnO с последующим отжигом при температуре 1350⁰С в течение 2 часов. В результате

получали феррит с содержанием 55 % мол. Fe_2O_3 , 30 % мол. MnO и 15 % мол. ZnO . В качестве органического связующего применялись термоотверждающиеся смолы (фенольные), полиэфир, эпоксидная смола, силикон, полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, натуральный и синтетический каучук [252].

Таблица 4.6

Зависимость частоты поглощения от размера ферритовых частиц с $\mu > 300$

| Размеры частиц порошка, мкм | Эффективно поглощаемая частота, ГГц |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1650-701 | 0,5-1,5 |
| 701-351 | 1,0-2,0 |
| 351-104 | 1,8-3,0 |
| 104-43 | 2,5-7,5 |
| <43 | 6,0-12,0 |

Таблица 4.7

Зависимость частоты поглощения от размера ферритовых частиц с $\mu < 300$

| Размеры частиц порошка, мкм | Эффективно поглощаемая частота, ГГц |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1650-701 | 1,0-3,0 |
| 701-351 | 2,0-4,5 |
| 351-104 | 4,0-6,0 |
| 104-43 | 5,0-7,5 |
| <43 | 6,0-12,0 |

Для устранения отраженного сигнала предназначена конструкция поглотителя, в котором на металлическом отражателе закреплена объемная ферритовая решетка (рис. 4.14) ячеистой структуры [253]. Стенки ячейки не однородны по толщине и полые внутри, их толщина уменьшается от основания к вершине, в результате чего размер самой ячейки также увеличивается. Стенки ячейки полые, но и могут быть заполнены поглощающим материалом. Высота стенок составляет 65-100 мм. Феррит выполнен путем спекания Ni-Zn или Mn-Zn порошка с связующим. Поглотитель является широкополосным и в частотном диапазоне 30 МГц-40 ГГц обеспечивает ослабление порядка 15 дБ.

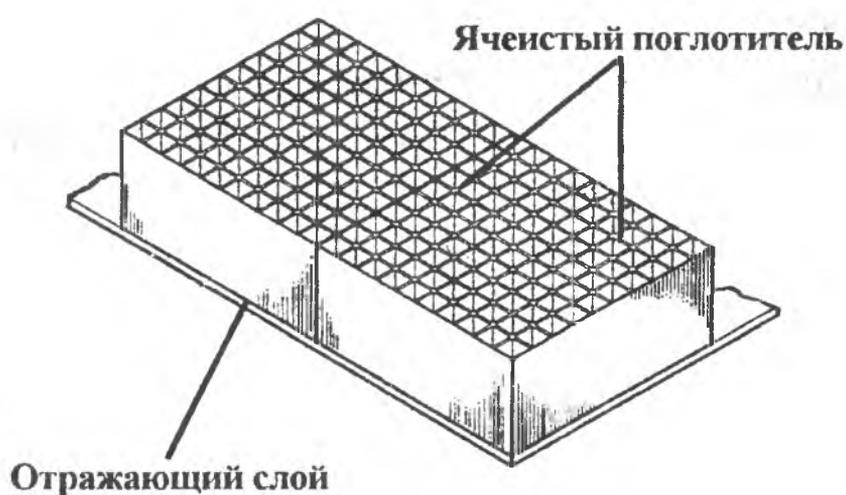


Рис. 4.14. Схема поглотителя ЭМИ ячеистой структуры

Эффективно поглощать электромагнитную волну может материал, выполненный в виде плоской решетки [254] из ферритовых не перекрывающихся

пластин, размещенных в матрице. Для устранения нежелательного отражения электромагнитной волны, матрица закрыта резистивной пленкой (рис. 4.15).

С целью уменьшения переотражения электромагнитных волн внутри помещения, особенно нежелательного на резонансных частотах [255], разработан поглотитель ЭМИ на основе ферритового материала, содержащего оксиды никеля, цинка, кобальта и железа в следующем соотношении, мас. %: NiO 8,5-10; ZnO 21-25; CoO 0,5-1; остальное - оксид железа. Ферритовый материал (при наклеивке его на металл) обеспечивает коэффициент поглощения электромагнитного поля более 10 дБ в диапазоне частот от 30 до 1200 МГц.

Для электромагнитной маскировки военной техники предлагается использовать специальный РПМ [256]. Он обладает достаточно хорошей гибкостью и эффективен в широком частотном диапазоне. Формируется данный поглотитель из не воспламеняющихся карбонатных материалов, состоящих на 65 % из углерода. Для такой конструкции наиболее предпочтительными являются графитовые волокна, с большой гибкостью и устойчивостью к изломам.



Рис. 4.15. Схема поглотителя ЭМИ

Для производства жестких конструкций поглотителей ЭМВ широко используются ферриты. Преимущество получили многослойные ферриты, характеристики, которых в отличие от монокристаллических ферритов более широкополосны. Материал на основе многослойного феррита описан в работе [257]. На проводящей основе закреплены два слоя феррита, причем с различными диэлектрическими и магнитными проницаемостями. Энергия падающей ЭМВ за счет магнитных потерь феррита превращается в тепловую энергию. Преимуществом является низкий коэффициент отражения ферромагнитных материалов. В данной работе показана возможность управления, характеристикой поглощения многослойного материала, используя для этого ферриты с известными характеристиками поглощения (рис. 4.16).

Радиолокационная видимость объектов различного назначения и конфигурации может быть уменьшена с помощью облегченного многослойного радиопоглощающего покрытия [258]. Один из слоев нанесен на отражающую электромагнитные волны поверхность, а остальные следуют последовательно один за другим, при этом количество слоев радиопоглощающего материала определяется требуемой величиной коэффициента поглощения покрытия. Радиопоглощающий материал, из которого

выполнены слои покрытия, включает в себя в качестве полимерного связующего синтетический клей "Элатон" на основе латекса и в качестве магнитного наполнителя - порошкообразный феррит или карбонильное железо при соотношении компонентов, мас. %: синтетический клей "Элатон" на основе латекса 80-20, порошкообразный феррит или карбонильное железо 20-80.

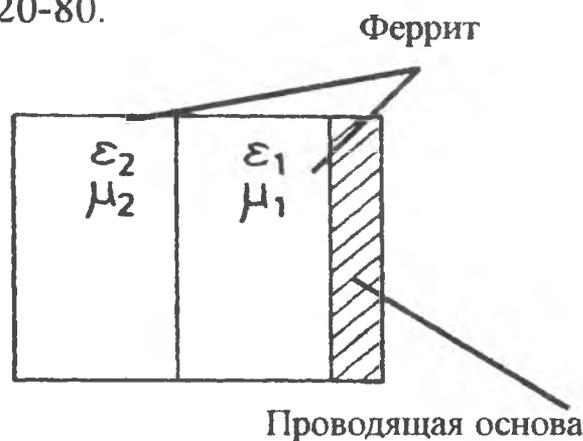


Рис. 4.16. Схема многослойного поглотителя на основе феррита

Оригинальная ферритовая структура имеет структуру шпинели (рис. 4.17) и содержит $\text{CuO-Fe}_2\text{O}_3$ ферритовую систему [259]. Синтез такой структуры проводится в твердой матрице феррита, заполненной жидкой фазой $\text{CuO-Fe}_2\text{O}_3$, что приводит к увеличению общих потерь, уменьшению толщины покрытия и сдвигу рабочей частоты покрытия.

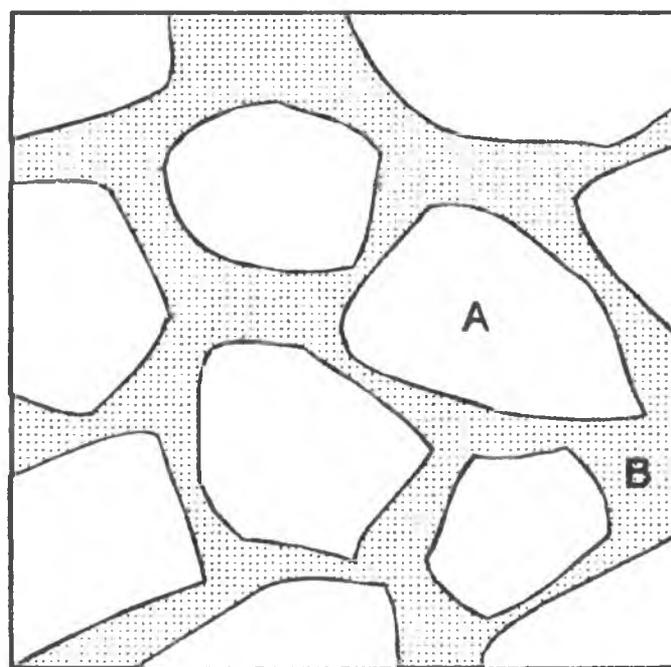


Рис. 4.17. Структура биферритового композиционного материала

Изменением значений концентрации компонент в пределах 40-60 % для CuO и для Fe_2O_3 можно увеличить параметр μ'' системы более чем в 2 раза. Это снижает толщину покрытия до 6,4 мм и расширяет рабочий диапазон частот до 150-950 МГц. В качестве исходного феррита для создания матрицы А используется $\text{Ni}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{Fe}_2\text{O}_3$, после заполнения которого жидким В формировались образцы для исследования в коаксиальных линиях. Уровень затухания в рабочем диапазоне частот - не хуже 10 дБ.

4.5. Радиопоглощающие материалы на основе сегнетоэлектриков и сегнетомагнетиков

Сегнетоэлектрики обладают очень высокой диэлектрической проницаемостью (1000-10000), сохраняющейся до диапазона СВЧ. На сантиметровых волнах в сегнетокерамике происходит диэлектрическая дисперсия, в результате которой ϵ' снижается до нескольких сотен, а $\text{tg}\delta$ имеет максимум. Во всем диапазоне СВЧ ϵ'' превышает 100, что обеспечивает очень высокое поглощение электромагнитных волн. Благодаря высокой ϵ' толщина резонансного четвертьволнового покрытия из сегнетокерамики также очень мала ($\lambda/4\sqrt{\epsilon'}$). Однако, полоса частот согласования чистого сегнетоэлектрика невелика, что не позволяет использовать его на практике. Поэтому применяются композиционные покрытия с небольшим содержанием сегнетокерамики.

Двухслойный поглотитель пониженной толщины содержит первый слой из феррита, а второй - из сегнетоэлектрика [260]. Благодаря этому достигается очень малая толщина при большом поглощении. Аналогичное двухслойное покрытие общей толщиной в четверть длины волны запатентовано в [261]. Композиционные покрытия из диэлектриков и ферромагнетиков могут наноситься на поверхность высокоскоростным плазменным напылением [262].

Слой ферромагнетика и сегнетоэлектрика могут быть из смеси соответствующих порошков с диэлектрическим связующим. Добавление наружного слоя сегнетоэлектрика позволяет существенно расширить полосу частот и снизить коэффициент отражения

В поглощающих покрытиях, состоящих из смеси порошков магнитного материала (феррита, карбонильного железа), сегнетокерамики (например, ЦТС) и равномерного связующего по [263], согласование на низких частотах может осуществляться по условиям "толстого" слоя ($\epsilon'=\mu'$, $\epsilon''\equiv\mu''$), в сантиметровом диапазоне - резонансного слоя, а в миллиметровом - "тонкого" слоя [264]. При этом за счет дисперсии могут выполняться условия самосогласования, когда при уменьшении λ , а одновременно ϵ' и μ' , толщина покрытия остается близкой к четвертьволновой, чем обеспечивается максимальная широкополосность.

Принципиально новые возможности при поиске и создании новых радиопоглощающих материалов открывает сравнительно новый класс веществ - сегнетомагнетики (СМ), в которых антисегнето- или сегнетоэлектрические свойства сочетаются с антиферро- или ферромагнитными и взаимосвязаны в некотором интервале температур в одном и том же веществе [265]. В настоящее время известно около 80 индивидуальных СМ - соединений и большое количество СМ - твердых растворов.

Анализ возможных перспективных применений СМ проведен в обзоре [266], в котором, однако, не рассматривается вопрос о создании на основе СМ радиопоглощающих материалов.

При создании на основе СМ подобных материалов очень важно, чтобы такие материалы обладали как высокими, с одной стороны, так и близкими - с другой, значениями относительных диэлектрической (ϵ') и магнитной (μ') проницаемостей.

Благодаря высоким значениям ϵ' и μ' достигается значительное замедление электромагнитных волн СВЧ диапазона при их распространении в СМ, пропорциональное $\sqrt{\epsilon' \mu'}$, а благодаря их близости - согласование СМ со свободным пространством (волновое сопротивление пропорционально $\sqrt{\epsilon'/\mu'}$) [267].

Ни одно из известных в настоящее время СМ - веществ не удовлетворяет требованию $\epsilon' = \mu'$. Известные СМ - твердые растворы также имеют $\mu' \ll \epsilon'$. Так, такой СМ - твердый раствор, как $\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3$ - $\text{Pb}(\text{Li}_{1/4}\text{Fe}_{1/4}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$ характеризуется $\mu' = 10$ при $\epsilon' = 930$ [268]. При этом СМ - вещество, имеющее большое поглощение СВЧ излучения при комнатной температуре, известно только одно - $\text{Ba}_3\text{FeReO}_6$, которое является сегнетоэлектриком-ферромагнетиком [269]. Однако технология его получения сравнительно сложна и в его составе находится довольно дорогой металл - рений. Поэтому недавно были разработаны новые материалы с большими потерями в СВЧ диапазоне при комнатной температуре. Это - керамические твердые растворы параэлектрика SrTiO_3 с СМ BiMnO_3 и BiCrO_3 со структурой перовскита.

В последнее время ведутся разработки радиопоглощающих материалов в виде конструкционных композитов на основе сегнетоэлектриков, ферромагнетиков и полупроводников. Исследованы композиционные радиопоглощающие покрытия, состоящие из соединенных связующим слоем дифракционных решеток (прямая и обратная решетки Френеля, решетка Фраунгофера), выполненных из углеграфитовой ткани [270]. За счет поглощения, рассеяния и интерференции достигнуто значительное ослабление мощности отраженных электромагнитных волн (~20 дБ) при небольшой удельной массе покрытия (2.0-2.5 кг/м² в диапазоне длин волн 0.8-3 см).

Композиционный радиопоглощающий материал, состоящий из хаотически или упорядоченно распределенных в связующем чешуек в количестве 0.1-10 об. % запатентован в США [271]. Каждая чешуйка представляет собой чередующиеся слои ферромагнитного металла (например, сплава NiFe) толщиной менее толщины скин-слоя и изолирующего диэлектрика (SiO , SiO_2 , MgF_2 , полиимиды) толщиной 5-10 нм. Большое поглощение осуществляется за счет высокой мнимой составляющей магнитной проницаемости композита, равной 1.47 при 5 об. % наполнителя и частоте 150 МГц. При необходимом согласовании и толщине 0.1-10 мм радиопоглощающий материал работает в диапазоне 5-6000 МГц. Материал может поглощать большие мощности и использоваться для СВЧ - нагрева.

4.6. Металлические экраны

4.6.1. Однослойные металлические экраны

Наибольшее распространение при металлическом экранировании получили металлические конструкции в виде пластин или листов. Анализируя эффективность экранирования электромагнитных полей плоской металлической пластиной (табл. 4.8), можно прийти к следующим выводам:

Эффективность экранирования плоской алюминиевой пластиной

| f , Гц | δ_c , мкм | Z_{c2} , Ом | A_1 , дБ | A_2 , дБ | A_0 , дБ | D , мкм |
|-----------|------------------|----------------------|------------|------------|------------|-----------|
| 10^{10} | 0,826 | $0,45 \cdot 10^{-1}$ | 10,5 | 66 | 76,5 | 1 |
| 10^8 | 8,26 | $0,45 \cdot 10^{-2}$ | 10,5 | 86 | 96,5 | 10 |
| 10^6 | 82,6 | $0,45 \cdot 10^{-3}$ | 10,5 | 106 | 116,5 | 100 |
| 10^4 | 826 | $0,45 \cdot 10^{-4}$ | 10,5 | 126 | 136,5 | 1000 |
| 10^2 | 8260 | $0,45 \cdot 10^{-5}$ | 10,5 | 146 | 156,5 | 10000 |

1. Металлические экраны при практически приемлемой толщине обеспечивают хорошую эффективность экранирования на всех частотах радиодиапазона, в том числе и на нижних частотах радиовещания.

2. Эффективность экранирования увеличивается с увеличением частоты, магнитной проницаемости μ , проводимости σ и толщины экрана d .

3. В диапазонах СВЧ толщина металлического экрана может иметь несколько микрометров и выполняться в виде тонкой металлической пленки $\mu=1$, нанесенной на экранируемое изделие.

4. При толщине экранов $d \ll \delta_c$ основная часть эффективности экранирования A_0 металлических экранов определяется первыми двумя отражениями от их поверхностей; при $d \gg \delta_c$, имеющем место в диапазонах СВЧ, сильно возрастает A_0 из-за потерь в толщине экрана.

5. Повторные отражения в металлическом объеме экрана практически не увеличивают общую эффективность экранирования и A_3 можно не учитывать при проведении расчетов.

6. Большое значение общей эффективности экранирования $A_0 = A_1 + A_2$ допускает уменьшение толщины экрана для низких частот примерно на порядок по сравнению с глубиной проникновения. Это приводит к уменьшению затухания экрана A_1 и снижению Z_{c2} , а следовательно, к повышению затухания за счет отражений A_2 . Однако последнее остается достаточно большим для того, чтобы обеспечить необходимую эффективность экранирования во многих практических применениях.

7. В рассматриваемых случаях было принято нормальное падение волны на поверхность экрана, но с изменением поляризации и угла падения будут меняться коэффициент отражения (увеличиваться) и коэффициент преломления (уменьшаться), и, следовательно, изменится A_0 .

4.6.2. Многослойные металлические экраны

Многослойные комбинированные конструкции экранов, состоящие из последовательно чередующихся немагнитных (медь, алюминий, латунь) и магнитных (сталь, пермаллой) слоев, применяются для получения высокой эффективности экранирования в широком частотном диапазоне, включая область низких частот, и обеспечения малых вносимых потерь в экранируемые цепи радиоэлектронной аппаратуры. Известно, что экранирующий эффект определяется совместным

ослаблением энергии за счет поглощения в толщине металла и отражения, обусловленного различными значениями характеристических сопротивлений среды на границах внешняя среда – металл и металл – экранируемая область. С уменьшением частоты коэффициент затухания в металле уменьшается, а эффективность экранирования за счет поглощения падает, поэтому экран, состоящий из нескольких тонких слоев различных металлов, обладает в низкочастотной области большим экранирующим действием по сравнению с однородным экраном той же толщины за счет увеличения числа отражений.

Эффективность экранирования многослойного экрана зависит от применяемых материалов, их расположения и соотношения толщин. Например, сочетание сталь – медь – алюминий обеспечивает меньшую эффективность экранирования, чем медь – сталь – алюминий. Кроме того, за счет внутреннего слоя экрана, выполненного из немагнитного металла, уменьшаются вносимые потери в экранируемые цепи аппаратуры по сравнению со сплошным магнитным экраном такой же толщины. Многослойная конструкция экрана оказывается особенно эффективной при экранировании квазистатических магнитных полей большой напряженности. В случае однослойного магнитного экрана при большом значении напряженности магнитной составляющей поля материал экрана входит в насыщение и магнитная проницаемость его резко снижается. Чтобы исключить насыщение, первый слой составного двухслойного экрана, обращенный к источнику магнитного поля, выполняется из магнитного материала с низкой магнитной проницаемостью, имеющего высокий уровень насыщения, или немагнитного металла, а второй слой – из материала с высокой магнитной проницаемостью и низким уровнем насыщения. При этом первый слой экрана уменьшает напряженность магнитного поля до величины, не вызывающей насыщения второго слоя, который обеспечивает экранирование.

Рассмотрим процессы отражения и преломления электромагнитной волны на примере плоского двухслойного экрана, у которого толщины слоев d_1 и d_2 . Выразив составляющие электромагнитного поля через эффективность экранирования \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 и учитывая коэффициенты отражения слоев экрана, получим, что в экранируемой области пространства суммарная амплитуда прошедших через экран волн равна

$$E_p = \mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2 E \sum_{n=1}^{\infty} (\Gamma_1 \Gamma_2)^{n-1} = \frac{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2 E}{(1 - \Gamma_1 \Gamma_2)}. \quad (4.6)$$

Следовательно, эффективность экранирования двухслойного экрана \mathcal{E}_{12} определяется эффективностью экранирования и отражения отдельных слоев экрана:

$$\mathcal{E}_{12} = \frac{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2}{(1 - \Gamma_1 \Gamma_2)}. \quad (4.7)$$

Таким образом, эффективность экранирования двухслойного экрана больше, чем произведение коэффициентов экранирования двух однородных экранов, что связано с дополнительным проникновением электромагнитного поля в экранируемую область за счет отражений между слоями составного экрана.

Аналогично могут быть получены расчетные выражения для определения коэффициента экранирования комбинированных экранов с тремя и более слоями. Для трехслойного составного экрана эффективность экранирования \mathcal{E}_{123} определяется выражением

$$\mathcal{E}_{123} = \frac{\mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2 \mathcal{E}_3}{[(1 - \Gamma_1 \Gamma_2)(1 - \Gamma_2 \Gamma_3) - \Gamma_2 \Gamma_3 \mathcal{E}_2^2]} \quad (4.8)$$

На практике наиболее широко применяются трехслойные экраны с одинаковыми наружными слоями $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_3$ и $\Gamma_1 = \Gamma_3$. В этом случае эффективность экранирования:

$$\mathcal{E}_{123} = \frac{\mathcal{E}_1^2 \mathcal{E}_2}{[(1 - \Gamma_1 \Gamma_2)^2 - (\Gamma_1 \mathcal{E}_2)^2]} \quad (4.9)$$

На основании приведенных расчетных выражений можно сформулировать основные рекомендации по проектированию многослойных комбинированных экранов:

1. Внутренние слои многослойного экрана для обеспечения большого экранирующего действия и достижения минимальных потерь, вносимых в экранируемые узлы РЭА, следует выполнять из немагнитных металлов. Наилучшие результаты дает экран с сочетанием слоев из немагнитных и магнитных материалов (например, медь – сталь, медь – сталь – медь и т.д.). Это связано с тем, что наибольшая эффективность экранирования обеспечивается за счет высокой отражательной способности меди и поглощающей способности стали.

2. Применение диэлектрических прокладок (пластмассы, картона, бумаги) или воздушных зазоров между металлическими слоями комбинированного экрана может приводить к повышению эффективности экранирования в случае, если их толщина значительно превышает толщину металлических слоев. Поэтому такие составные экраны могут использоваться, если по условиям проектирования допускается некоторое увеличение их габаритов и массы.

3. При выборе оптимального соотношения толщин слоев в экране медь – сталь для наиболее сложно обеспечиваемого экранирования магнитных полей следует рассматривать следующие характерные частотные области:

а) 0-0,5 кГц; наибольшая эффективность экранирования обеспечивается однородным стальным экраном;

б) 0,5-10 кГц; наибольшая эффективность экранирования обеспечивается при равной толщине медного и стального слоев;

в) 10-50 кГц; наибольшая эффективность экранирования достигается при уменьшающейся толщине медного слоя экрана и увеличивающейся толщине стального;

г) свыше 50 кГц; применение составного экрана нецелесообразно, так как достаточно большая эффективность экранирования обеспечивается однородным металлическим экраном из меди, алюминия или латуни.

Необходимо отметить, что конструктивно составные комбинированные экраны сложны и громоздки. Поэтому при проектировании следует рассмотреть возможные способы изменения компоновки аппаратуры для снижения влияния помехонесущего электромагнитного поля с целью обеспечения необходимой эффективности экранирования с помощью однослойного экрана.

4.7. Сетчатые экраны

Иногда по конструктивным соображениям удобно изготавливать и применять экраны не из сплошного листового материала, а из сетки [272]. В случае, когда шаг сетки a , и диаметр проволоки D много меньше четверти длины волны, то сетчатый экран практически эквивалентен сплошному. С повышением частоты поведение сетки начинает существенно отличаться. Так как у сетки отсутствует эффект ослабления излучения при распространении его в объеме экрана и поверхностный эффект приводит лишь к увеличению активного и индуктивного сопротивления проволоки, то эффективность сеток быстро падает на высоких частотах (табл. 4.9) [273, 274].

Таблица 4.9

Сравнительные характеристики эффективности экранирования (в дБ) сетчатых и металлических экранов с различными параметрами.

| Вид экрана | Материал экрана | Частота, кГц | | | | |
|-------------------------------------|---|--------------|-----|------|-------|--------|
| | | 10 | 100 | 1000 | 10000 | 100000 |
| Металлические листы толщиной 0,5 мм | Сталь | 64 | 87 | 120 | 120 | 120 |
| | Медь | 67 | 70 | 88 | 120 | 120 |
| | Алюминий | 65 | 66 | 80 | 120 | 120 |
| Металлические Сетки | Медь, проволока 0,1мм Ячейки 1x1 мм | 65 | 55 | 50 | 42 | 32 |
| | Сталь, проволока 0,1мм ячейки 1x1 мм | 48 | 47 | 42 | 36 | 29,5 |

Сетчатые экраны имеют худшие экранирующие свойства, чем сплошные. Однако в ряде случаев (когда достаточно ослабления потока энергии СВЧ диапазона на 20-30 дБ) широко применяются экраны из сеток.

Ослабление сетчатых экранов зависит от размера ячеек и диаметра проволоки. Общие закономерности поведения и применения сетчатых экранов простой формы (отрезки проволоки расположены перпендикулярно друг другу) выведены в [275].

1. При $a/D = \text{const}$ редкие сетки из данного материала на низких частотах более эффективны, а на высоких частотах менее эффективны, чем густые. Это объясняется тем, что активное сопротивление каждой проволоки на низких частотах обратно пропорционально D^2 , на высоких же частотах взаимная индуктивность мало зависит от D .

2. При одинаковых a и D медные сетки на низких частотах лучше стальных во столько раз, во сколько удельная проводимость меди больше, чем стали. С повышением частоты это различие сглаживается, так как основную роль начинает играть внешняя индуктивность проволок.

3. При постоянном шаге сетки и одним и тем же материале сетки из толстой проволоки эффективнее сеток из тонкой проволоки.

4. Двухстенный экран из сетки эффективнее одностенного экрана из той же сетки.

5. Для обеспечения нормальной работы сетчатого экрана необходимо обеспечить хороший электрический контакт по швам в местах соединений отдельных кусков сетки.

В настоящее время для защиты от ЭМИ применяются средства индивидуальной защиты (СИЗ) - радиозащитные костюмы, халаты, комбинезоны, защитные маски, фартуки, очки и др. Ввиду того, что СИЗ стесняют движения работающего и несколько ухудшают гигиенические условия, их используют лишь в особых случаях, например, при ремонтных работах в аварийных ситуациях, во время кратковременных настроечных и измерительных работ с радиотехническим оборудованием и в антенном поле радиотехнических станций. Они изготавливаются из хлопчатобумажной ткани с микропроводом и, в принципе, представляют собой сетчатые экраны [276].

Для изготовления экранных штор, драпировок, чехлов, специальной одежды применяются специальные ткани (например, "Ткань хлопчатобумажная с микропроводом арт. 7289"), в структуре которых тонкие металлические нити образуют сетку с размерами 0,5×0,5 мм. Защитные свойства этой ткани представлены в табл. 4.10.

Как видно из табл. 4.10, эффективность подавления ЭМИ такими тканями падает с увеличением частоты, поэтому возникает необходимость разработки эффективных эластичных экранов для миллиметрового диапазона. Особую значимость приобретает проблема создания поглощающих материалов, ввиду невозможности применения в некоторых случаях отражающих экранов и необходимости создания маскирующих покрытий [277].

Таблица 4.10

Защитные свойства ткани с микропроводом

| Длина волны, см | 0,8 | 3,2 | 10 | 25 | 50 | 100 |
|--------------------|-----|-----|----|----|----|-----|
| Ослабление ЭМИ, дБ | 20 | 28 | 40 | 43 | 46 | 54 |

Эффективность сетчатого экранирующего материала, выполненного в виде текстиля, можно повысить, осаждавая вокруг тонкого проводящего каркаса феррит, содержащий композит с высоким μ [278]. Композит получают из ферритового порошка и связующего материала, в качестве которого используется высокомолекулярное органическое соединение. В случае использования текстиля применяют ткань с достаточной гибкостью для обертывания вокруг объектов различной формы.

При разработке конструкций защитного и сигнального экранирования для обеспечения ЭМС радиоэлектронных устройств, также используют сплошные и сетчатые металлические экраны [279]. Защитное экранирование подразумевает уменьшение собственных побочных излучений устройства и защиту его от воздействия внешних источников. Сигнальное экранирование подразумевает повышение помехоустойчивости линий связи и передающих цепей в устройстве, достигаемое за

счет уменьшения внешних наводок. При защитном экранировании обязательно заземление экрана. Для случаев сигнального экранирования условия заземления рассматриваются в каждом конкретном случае в зависимости от вида используемой линии связи, частоты передаваемого сигнала. Довольно часто используют цельнометаллические и сетчатые экраны с высокой проводимостью. При необходимости повышения эффективности экранирования применяют биметаллические или многослойные листы и сетки. В случае использования материалов, обладающих высокой электропроводностью, большая часть энергии отражается. В идеале, когда проводимость вещества бесконечна, толщина поверхностного слоя стремится к нулю и поле вообще не проникает в толщу экрана. Поле в защищаемой области пространства может возникнуть, лишь обогнув идеальный проводник, следовательно, вся энергия ЭМИ отражается.

Для обеспечения наименьшего отражения от внешней поверхности экрана, обращенной к источнику ЭМИ, требуется реализовать плавный переход волновых характеристик от воздуха к рабочему материалу экрана, т.е. сгладить границу раздела сред. Уменьшение отражения ЭМП от поверхности радиопоглощающих материалов добиваются и другими путями, например, тем, что материалу придается структура или форма, увеличивающая его активную поверхность, обращенную к излучению. Материал делается волокнистым или пористым, со сложной, покрытой пирамидами или конусами, поверхностью. Падая на такую поверхность, электромагнитная волна многократно отражается и теряет значительно больше энергии, чем при падении на ровную поверхность. Подобного эффекта добиваются, когда слои поглощаемого материала (активированный уголь, сажа, порошок карбонильного железа и т.п.) располагают в порядке возрастания их плотности по мере удаления от внешней поверхности экрана, т.е. при постепенном увеличении концентрации проводящих добавок по мере удаления от поверхности материала.

Экраны, выполненные из таких материалов, поглощают электромагнитную энергию в широком диапазоне частот и являются более широкополосными по сравнению с поглотителями резонансного типа, использующими четвертьволновое согласование или специфические особенности материала.

Большинство радиопоглощающих материалов (РПМ) имеет значительный вес (их толщина пропорциональна длине волны), высокую стоимость, они чувствительны к воде, пыли, подвержены быстрой эрозии и т.п., поэтому их применение в технике защиты от ЭМП довольно ограничено. В последнее время ведутся работы по созданию покрытий для маскирования и имитации военных объектов, РПМ новых типов, отличающихся пониженной толщиной и массой [280].

Перспективными являются РПМ на основе магнитомягких аморфных сплавов системы Fe-Ni-Co с уникально высокой проницаемостью в слабых магнитных полях [281]. Из таких материалов с помощью высокоскоростных и высокоэнергетических технологий получают экраны, работающие в областях сантиметровых и дециметровых длин волн. Реальным путем повышения эффективности таких защитных экранов является создание нанокристаллической структуры в аморфной матрице.

Оригинальная конструкция РПМ основана на металлической решетке, расположенной на стеклянной подложке (рис. 4.18). Поглотители собраны на антенных элементах из проводников трубчатой формы, расположенных на расстоянии, меньшем четверти минимальной длины волны друг от друга. В местах пересечения проводников располагаются выпрямительные секции, преобразующие индуцированный высокочастотный переменный ток в постоянный.

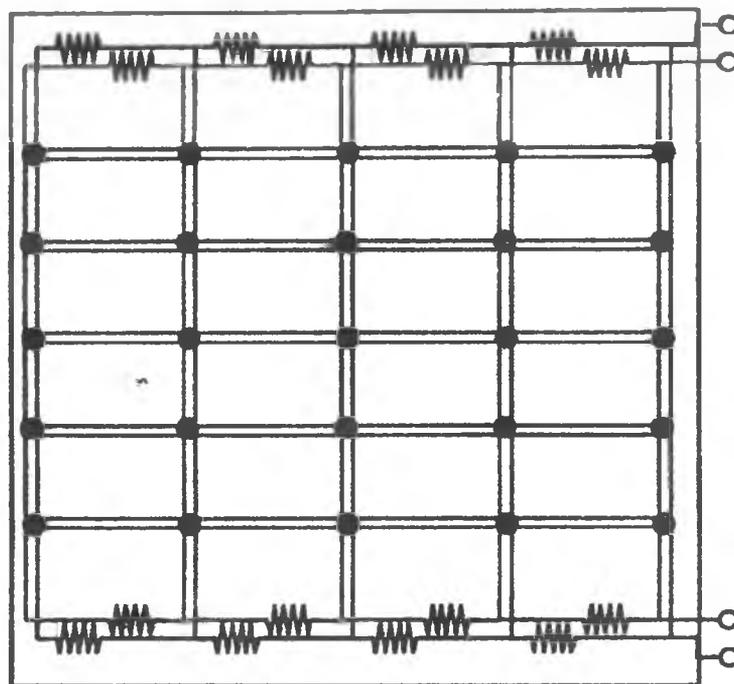


Рис. 4.18. РПК антенного типа

4.8. Комбинированные радиопоглощающие материалы

Как уже отмечалось выше, многие РПП основаны на гашении падающей волны путем ее преобразования в поверхностную с последующим подавлением. Такие РПП отличаются значительными геометрическими размерами, поэтому часто встречаются покрытия, сочетающие в себе преимущества нескольких типов поглотителей. РПМ, изготовленные из пластин древесины, пропитанных суспензией порошка графита, которые после сушки склеиваются друг с другом с различной ориентацией волокон в соседних пластинах, имеют вид пирамиды. Для применения в безэховых камерах разработан широкодиапазонный материал, представляющий собой пористый материал шиповидной структуры, имеющий зубцы на поверхности, отражающую способность которой следует уменьшить. На боковых поверхностях шипов наклеиваются более мелкие элементы, также имеющие шиповидную структуру. Все неоднородности изготавливаются механическим способом и наклеиваются в соответствующем порядке.

Для создания РПП может быть использована гребенчатая структура (рис. 4.19). Общая высота поглотителя должна быть больше, чем длина волны нижней рабочей частоты, а высота между соседними зубцами меньше, чем $\frac{1}{4}$ длины волны нижней рабочей частоты [282]. Для диапазона частот 2,0-18 ГГц высота структуры должна составлять около 2,1 длины волны в свободном пространстве, то есть 32 см, а расстояние между отдельными зубцами – 10,8 см. Гребни изготавливаются из РПМ LS-16, производимого Emerson & Cuming Inc., и могут быть многослойными. Исследовали конструкции с 4-мя слоями покрытия и 6-слойной структурой, в которой слой

расположены в порядке увеличения проводимости. Использование многослойного покрытия позволяет повысить эффективность РПМ в рабочем диапазоне частот и при наклонном падении электромагнитной волны.

Для создания РПП используют шиповидную структуру в виде конусов, треугольных или прямоугольных пирамид [283]. Поглотитель изготавливается из отвержденного эластомера, основанного на кремнийорганическом соединении. Материал содержит инертный порошковый кремнийорганический наполнитель. Как эластомер, так и наполнитель неэлектропроводные. Поверхность поглотителя, обращенная к источнику излучения, имеет специальную форму островерхих пирамид с прямоугольным или треугольным основанием (рис. 4.20). РПМ рассчитан на рабочую частоту 1 ТГц и имеет высоту от 1 до 3 мм. В рабочем диапазоне 0,5-2,5 ТГц обеспечивается затухание сигнала на величину 20 дБ.

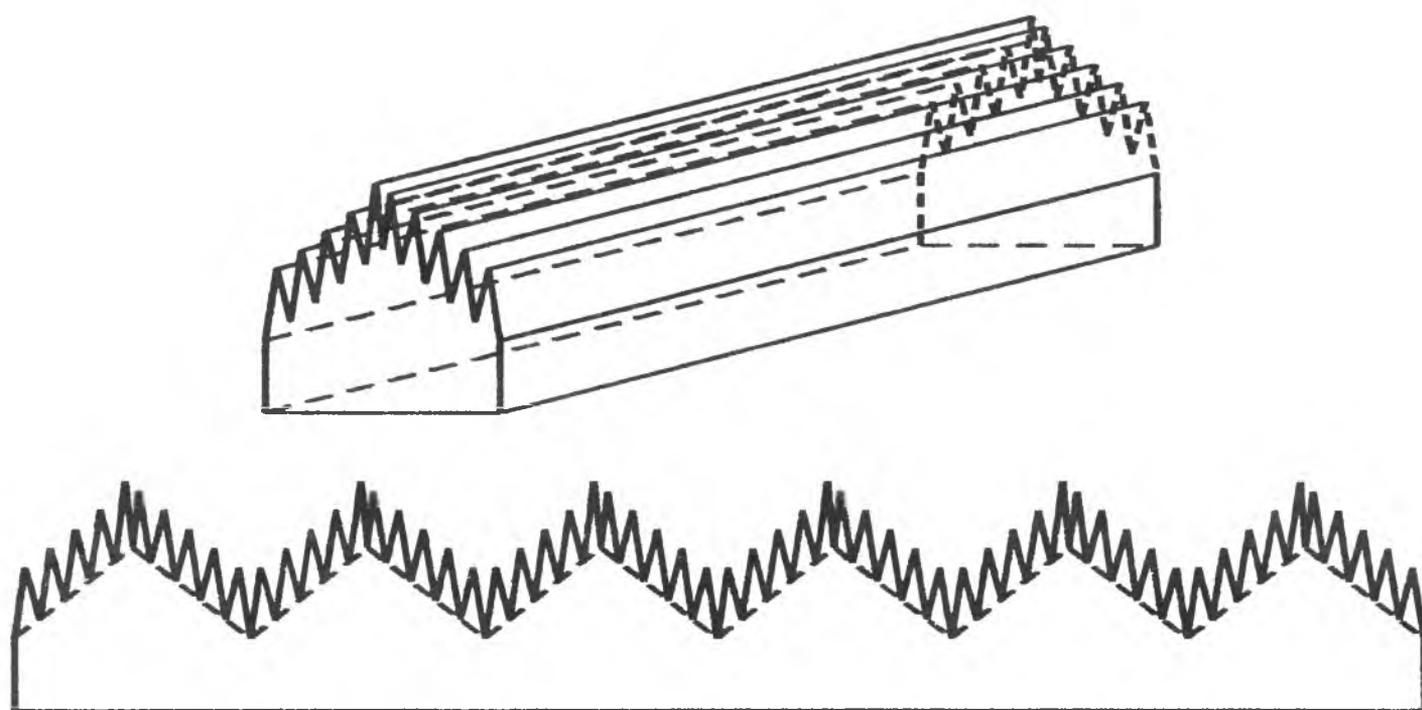


Рис. 4.19. РПМ гребенчатой структуры.

"Шахтный" принцип создания РПМ эффективно используется при необходимости поглощения энергии падающей электромагнитной волны при любых углах падения и поляризации [284].

Данный РПМ состоит из набора металлических стенок, образующих волноводные системы, которые преобразуют энергию падающей волны в энергию направляемых волн (рис. 4.21 а, б). Сами эти стенки и полученные волноводы покрываются для облегчения конструкции и повышения ее эффективности вспененным поглощающим материалом. Сверху поверхность поглотителя закрывается диэлектрической пластиной. Причем конструкция волноводов не обязательно должна быть прямоугольной, возможно также использование треугольных и микрополосковых конструкций (рис. 4.21 в, г).

РПМ пирамидальной формы отличается от предыдущих тем, что распределенные на поверхности пирамидальные выступы не стыкуются один с другим, а находятся на некоторой дистанции [285]. Подложка, на которой сформированы неоднородности, изготавливается из NiZn и MnZn ферритов. Материал работает в диапазоне частот 0,01-10 ГГц.

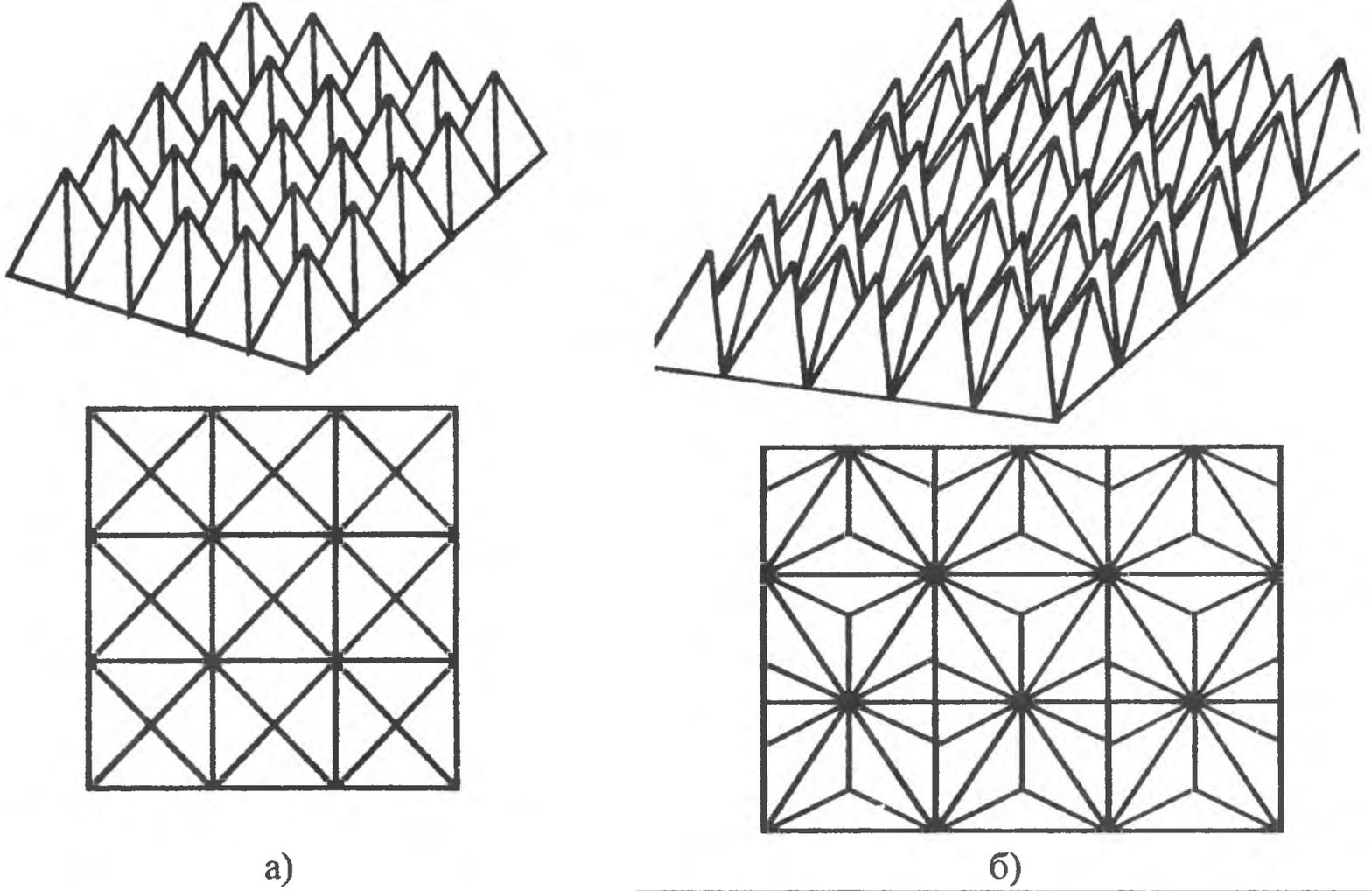


Рис. 4.20. Внешний вид РПП с геометрическими неоднородностями в виде пирамид

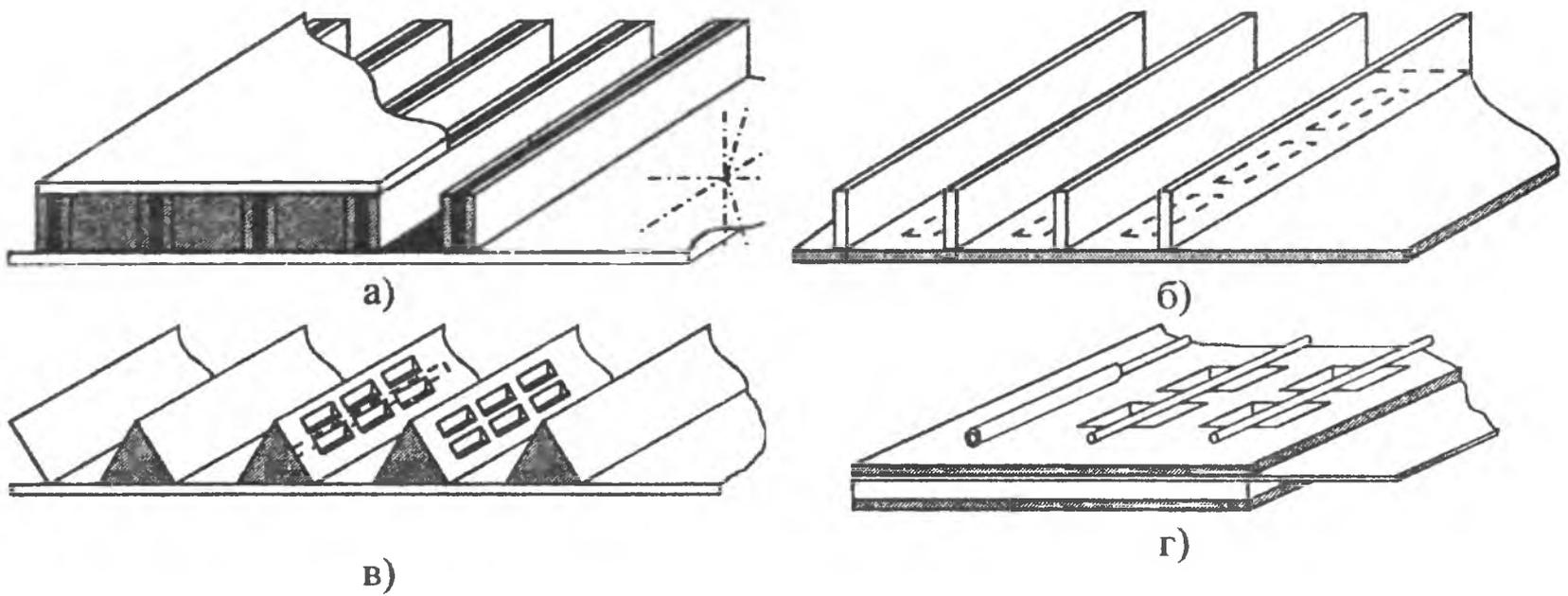


Рис. 4.21. РПМ "шахтной" структуры.

Повысить эффективность пирамидальной или гребенчатой структуры можно нанесением на высокотепло- и электропроводящий каркас радиопоглощающего покрытия на основе эпоксидной смолы с карбонильным железом (рис. 4.22). Эпоксидная смола имеет диэлектрическую проницаемость, равную 20. РПМ рассчитан на диапазон 50 ГГц.

Угол наклона граней пирамиды подбирается таким образом, чтобы максимально уменьшить энергию отраженного сигнала [286]. Экспериментальным путем было обнаружено, что оптимальным является угол около $12,5^\circ$.

РПМ пирамидальной формы, имеющий пластиковую основу для пропитки волокон с диэлектрической константой меньше 6, описан в работе [287]. Основным

материалом здесь является термоотверждающийся или термопластичный волокнистый пластик, который может быть пропитан проводящим или магнитным наполнителем.

Японскими разработчиками предлагаются РПМ с геометрическими неоднородностями в виде синусоиды и меандра [288, 289], изготовленными из поглощающего композита и нанесенными на проводящую отражающую поверхность. Отмечается, что линейный размер неоднородностей не должен превышать длину волны падающего излучения.

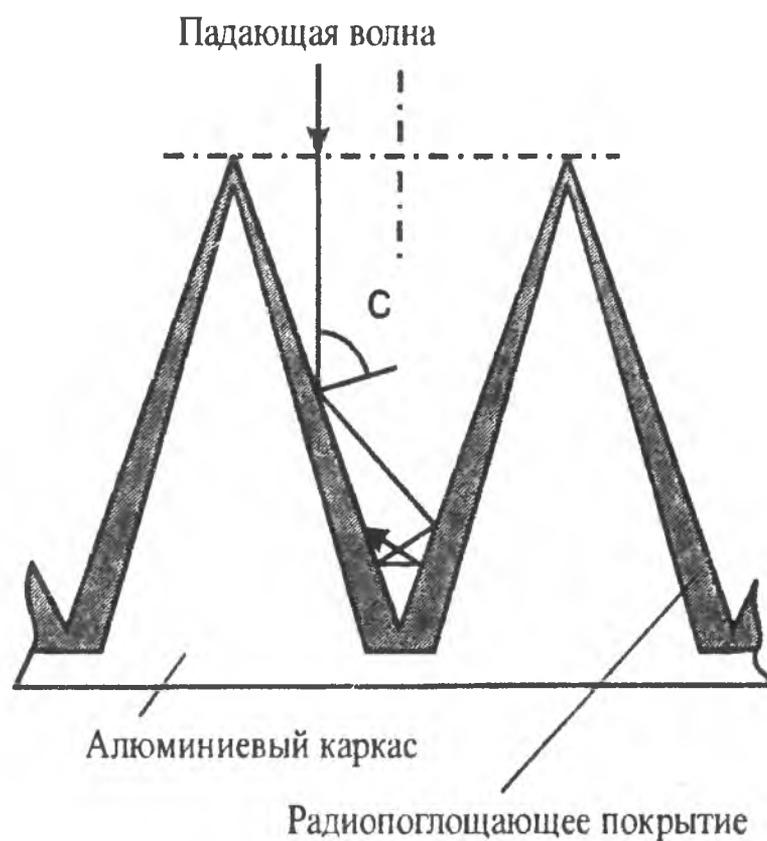


Рис. 4.22. Конструкция пирамидального типа с РПП.

Уменьшение эффективной поверхности рассеяния, например, средств авиации достигается путем формирования случайно ориентированных и распределенных на поверхности полостей, имеющих круглую форму и заполненных диэлектрическим материалом [290].

Исследования по уменьшению эквивалентной поверхности рассеяния (ЭПР) объектов показали, что подбором электрических параметров покрытия можно уменьшить ЭПР в 10 раз [291]. При рассмотрении металлических, диэлектрических, полупроводниковых и плазменных оболочек наилучших характеристик можно добиться, применяя полупроводниковые материалы, у которых $\text{tg}\Delta=1$ (табл. 4.11).

Отмечено, что размер оболочки должен быть минимальным, а форма – конусной или вытянутой.

Комбинированный РПМ имеет электропроводящий каркас, в котором сформированы U-образные пустоты, согласующиеся с рабочей длиной волны (рис. 4.23) [292]. Отверстия в каркасе могут быть различной формы – круглые, прямоугольные, шестиугольные и т.д.

Каркас изготавливается вспениванием жидкого неорганического материала с последующим отвердеванием, после чего он размещается на пластине 5 из композитного материала, содержащего проводящий наполнитель 6. Каждая секция РПП размером $3 \text{ см} \times 1 \text{ м}^2$ закрывается с боков отражающей металлической пластиной

11 и размещается на металлической подложке 4. Пустоты А заполняются ферритовым поглотителем на основе Fe_3O_4 (50 % феррита + 50 % силикона А 5755). Сверху конструкция закрывается многослойным покрытием, включающим несущий слой, прикрепленный к каркасу с помощью эпоксидного клея, на котором размещены пластины из кевларовой керамики 8 и 9, закрытые диэлектрическим слоем из силиконовой пластмассы 10. Поглощающая характеристика такого материала представлена на рис. 4.24. Она представляет собой зависимость коэффициента поглощения, обратного коэффициенту отражения, от частоты излучения. В этом случае принимается, что падающая волна полностью поглощается в экране и отражается от него, а поле за экраном равно нулю.

Таблица 4.11

Зависимость ЭПР объектов от материала оболочки

| Материал | Металл | Диэлектрик | Полупроводник | Плазма |
|--|-----------|------------|---------------|--------|
| ЭПР, м ² | 0,81 | 3,63 | 0,039 | 0,58 |
| Диэлектрическая проницаемость, ϵ' | - | 5 | 1,5 | 0,5 |
| Удельная проводимость, См/м | 10^{12} | 1000 | 0,025 | 0,008 |

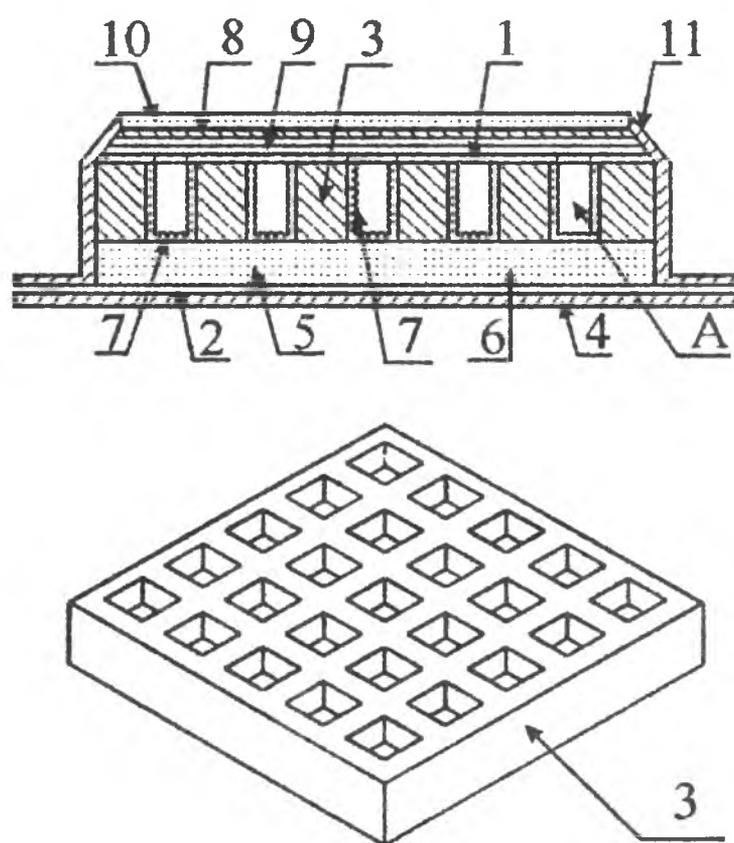


Рис. 4.23. Конструкция РПМ с полостями в каркасе.

В аналогичной конструкции различие заключается лишь в том, что поглощающий каркас изготавливается из смеси ферритового порошка, латунных или медных волокон диаметром 0,5-0,7 мм и длиной 10-15 мм с фенольными смолами в качестве связующего с последующим прессованием каркаса необходимой формы [293]. Сверху конструкция закрывалась защитным радиопрозрачным слоем из стекла, кевлара или другой керамики. Отмечается значительное уменьшение отраженных ЭМИ в широком диапазоне частот: - 15 дБ для 1-3 телевизионных каналов и - 20 дБ для более высоких частот, вплоть до 18 ГГц.

Пластина РПП может быть изготовлена из металла, феррита или пары ферритов [294], в которой расположены корректирующие полости круглой или крестообразной формы (рис. 4.25). Эти полости могут быть заполнены диэлектрическим или магнитным материалом (титанат бария, полиэтилен, графит и т.п.) для коррекции характеристического сопротивления панели. Толщина поглощающей панели определяется свойствами самого материала и рабочей частотой. При изготовлении из стальной пластины РПМ, настроенного на частоту 20 ГГц, толщина материала должна равняться 0,6 мм, и корректирующие полости диаметром 1 мм должны располагаться на расстоянии 2 мм одна от другой.

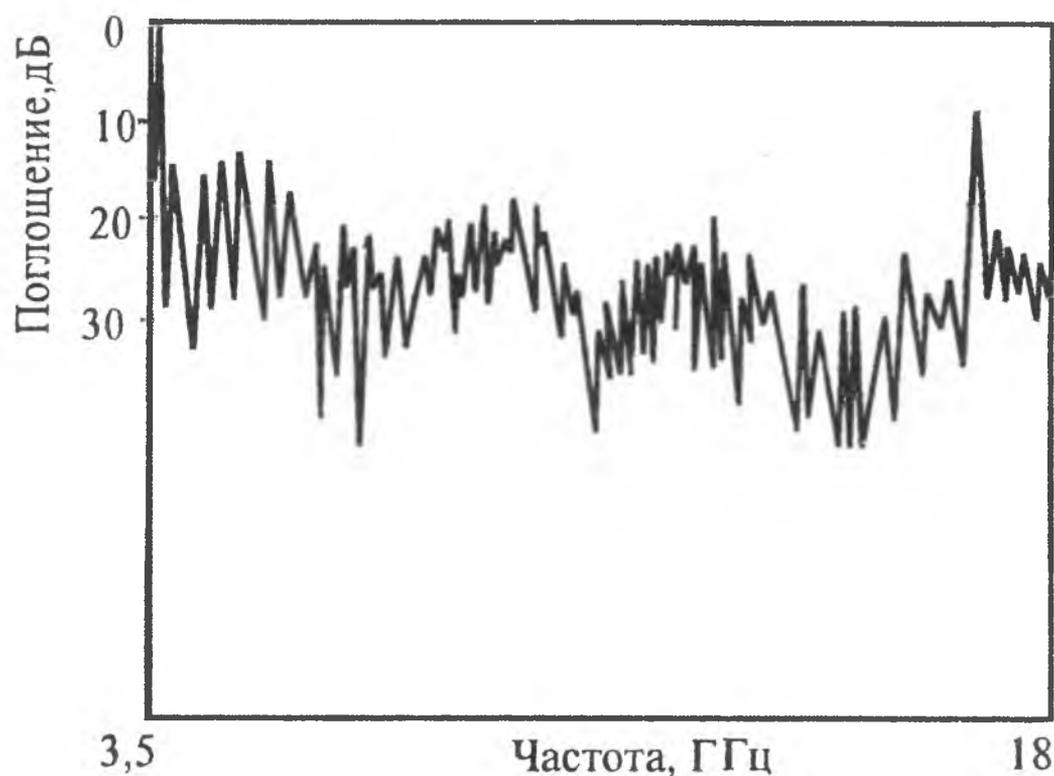


Рис. 4.24. Амплитудно-частотная зависимость коэффициента поглощения РПП с полостями, заполненными ферритом.

Проведенные испытания таких материалов показали, что при толщине менее 1 мм и при наличии полостей они обеспечивают коэффициент отражения менее -15 дБ лишь в узкой полосе частот: 1,8-2,3 ГГц. Однако при увеличении плотности отверстий в 2 раза наблюдается расширение полосы и уменьшение значения коэффициента отражения до уровня -20 дБ.

Многослойные пленочные покрытия получают либо чередованием слоев из двух различных материалов, либо созданием наборной градиентной структуры. РПП состоит из чередующихся слоев феррита и полимерного композита на основе магниторезистивных материалов, материалов со сверхструктурой, проводящих оксидов [295]. При создании радиопоглотителей реализован принцип чередования слоев с высоким и низким удельным сопротивлением или магнитной проницаемостью (рис. 4.26) [296].

Принцип подавления ЭМИ заключается в многократном переотражении падающей волны внутри материала. Чередующиеся слои формируются из пар нержавеющей сталь - алюминий, алюминий - магнитный сплав (15,7 % Fe, 79 % Ni, 5 % Mo, 9,3 % Mn). Каждый слой толщиной 0,5 мкм наносится на подложку и результирующий экран оказывается эффективнее экрана из мономатериала такой же

толщины. В диапазоне частот 65-265 МГц эффективность такого экрана составляет – 45 дБ по сравнению с – 20 дБ для медного и – 35 дБ для серебряного и алюминиевого экранов.

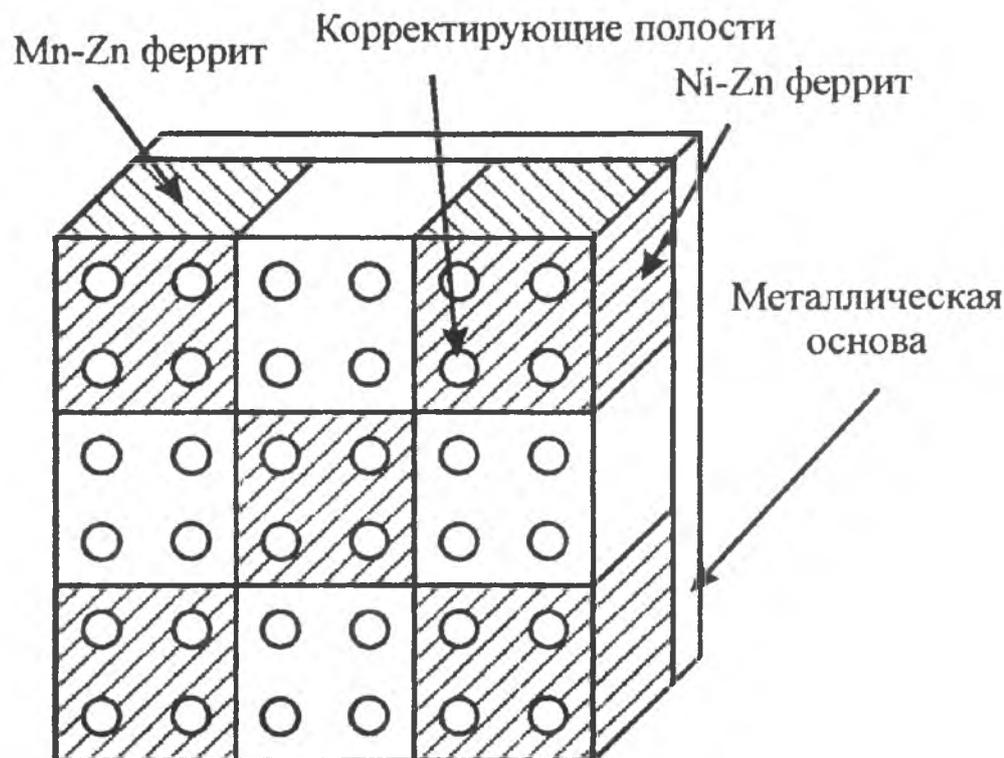


Рис. 4.25. Конструкция радиопоглощающей пластины с корректирующими полостями.

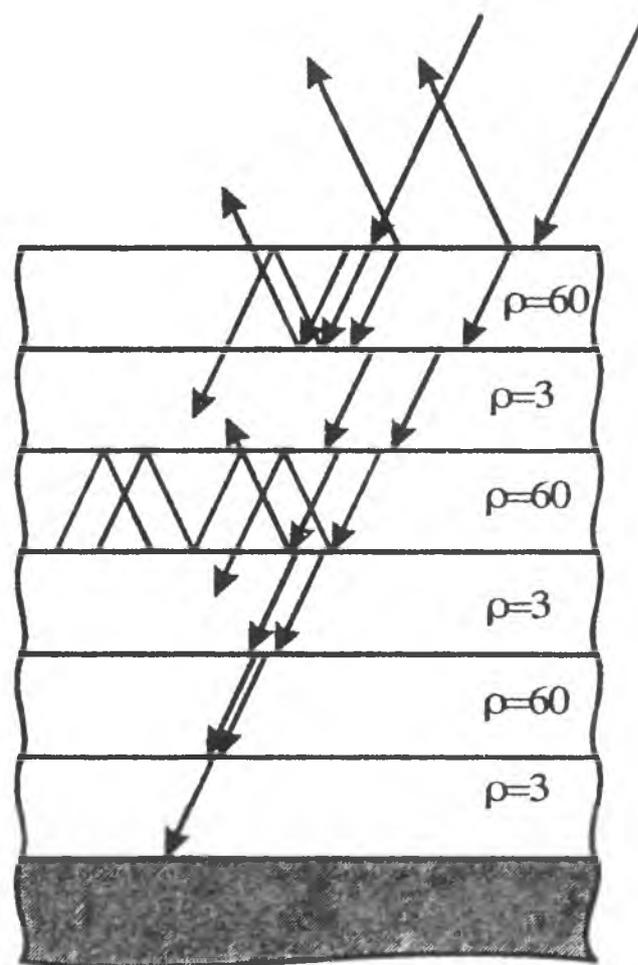


Рис. 4.26. Подавление ЭМИ в многослойном тонкопленочном экране.

При нанесении чередующихся диэлектрических и радиопоглощающих слоев на отражающую основу для обеспечения поглощения ИК волн в качестве основы могут быть использованы металлы, проводящие оксиды, нитриды, силициды и сульфиды. Для

поглощающего слоя применяют Cr, V, Pd, Ni, Pt или нестехиометрические оксиды, такие как TiO_x [297].

Предлагается изготавливать наборные РПМ [298] из слоев магнитного материала 1, нанесенного на немагнитную основу 2 (см. рис. 4.27). Следует отметить простоту контроля параметров такого материала, легкость и воспроизводимость по сравнению с композитами, где тяжело обеспечить малый разброс размеров магнитных частиц. Эффективность такого материала определяется количеством слоев и, следовательно, общей толщиной, а сборка слоев вместе производится различными способами.

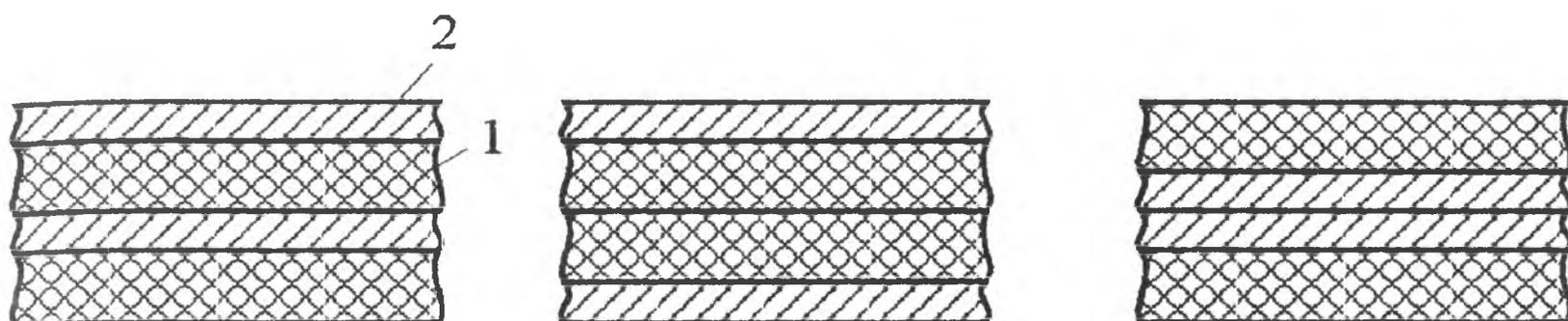


Рис. 4.27. Способы формирования многослойных пленочных РПМ:
1 – магнитный материал; 2 – немагнитная основа

Конструкция, представленная на рис. 4.28, имеет отличительную особенность, заключающуюся в наличии диэлектрических защитных слоев 4 и 5 сверху и снизу, формируемых из высокомолекулярных полимеров [299].

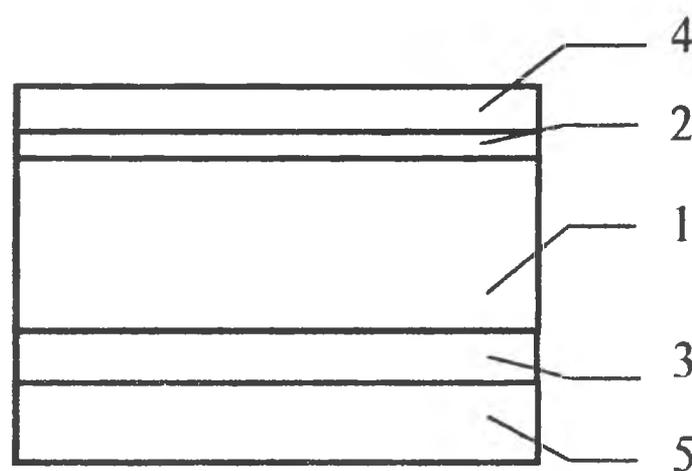


Рис. 4.28. Конструкция пленочного поглотителя:

1 – диэлектрическая пленка, 2 – резистивная пленка, 3 – отражающая пленка, 4 и 5 – защитная пленка

Материалами для диэлектрического рабочего слоя 1 являются прозрачные органические высокомолекулярные соединения: поляризуемый электрическим полем композит, включающий метакрилат, металлметакрилат, акрилонитрил, метакрилонитрил и их полимеры, винилиден цианид или его сополимер. Резистивная пленка 2 должна пропускать половину падающей энергии и формируется из оксидов и нитридов металлов и их смесей, нанесенных методами ионного осаждения и вакуумного распыления. Отражательный слой 3 делается из металлов или проводящих оксидов. Пленочные покрытия формируются с использованием простых технологий и процесс их получения обладает хорошей воспроизводимостью, но в основном поглотители такого типа работают в диапазоне видимых и инфракрасных волн. С

смолы, тефлон, дерево, керамика, резина, бумага. Для формирования отражающего слоя 5 используются металлические пластины, металлическая фольга, сетки, тканые угольные материалы и металлические изделия. Резистивный слой 3 формируют осаждением или напылением тонких пленок оксидов, нитридов металлов или из проводящего угольного покрытия. Оптимальное значение удельного сопротивления резистивного слоя, позволяющее добиться максимального поглощения для волн ТЕ и ТМ типа, равно 140 Ом/м^2 [301].

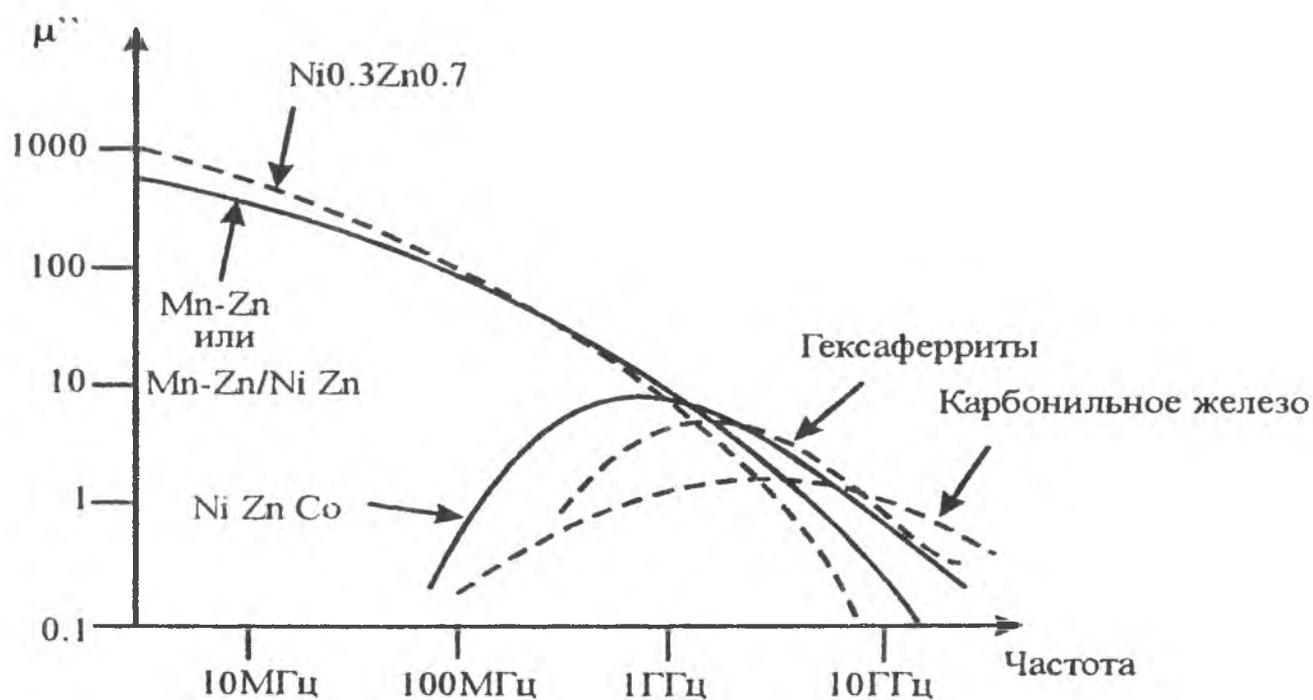


Рис. 4.30. Зависимость магнитных свойств некоторых материалов от частоты.

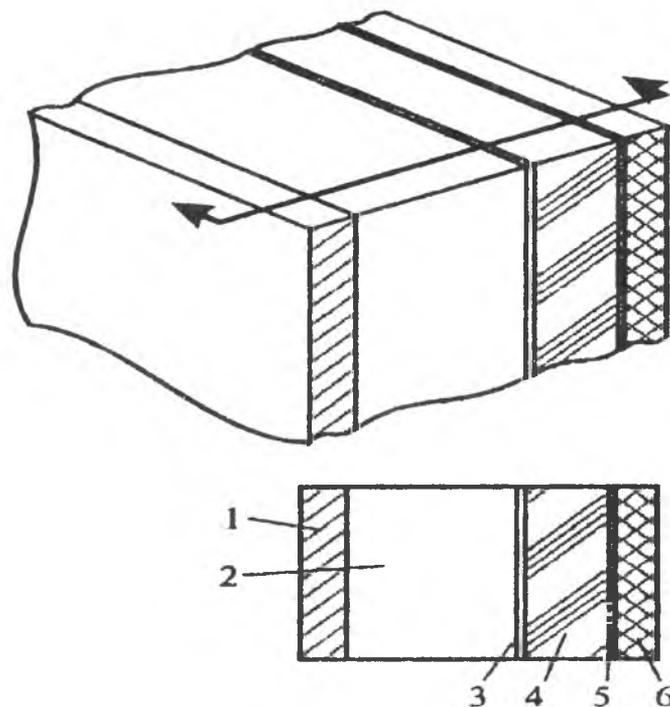


Рис. 4.31. Типичная жесткая конструкция многослойного радиопоглотителя: 1, 4 – диэлектрик, 2 – воздушное пространство, 3 – резистивный слой, 5 – отражающий слой, 6 – стеклянная основа.

Для регулирования входного характеристического сопротивления, расширения частотного диапазона и увеличения эффективности экрана в конструкцию дополнительно вводят еще один резистивный слой, обычно формируемый из TiO (рис. 4.32). Тем не менее предложенные конструкции остаются относительно узкополосными и настроены на рабочую частоту 2,8-3 ГГц.

Широкополосный радиопоглотитель, работающий в СВЧ диапазоне, создан на основе чередующихся проводящих и диэлектрических слоев [302]. Конструкция

поглотителя содержит металлическую основу, на которой последовательно формируются резистивные и диэлектрические слои (рис. 4.33).

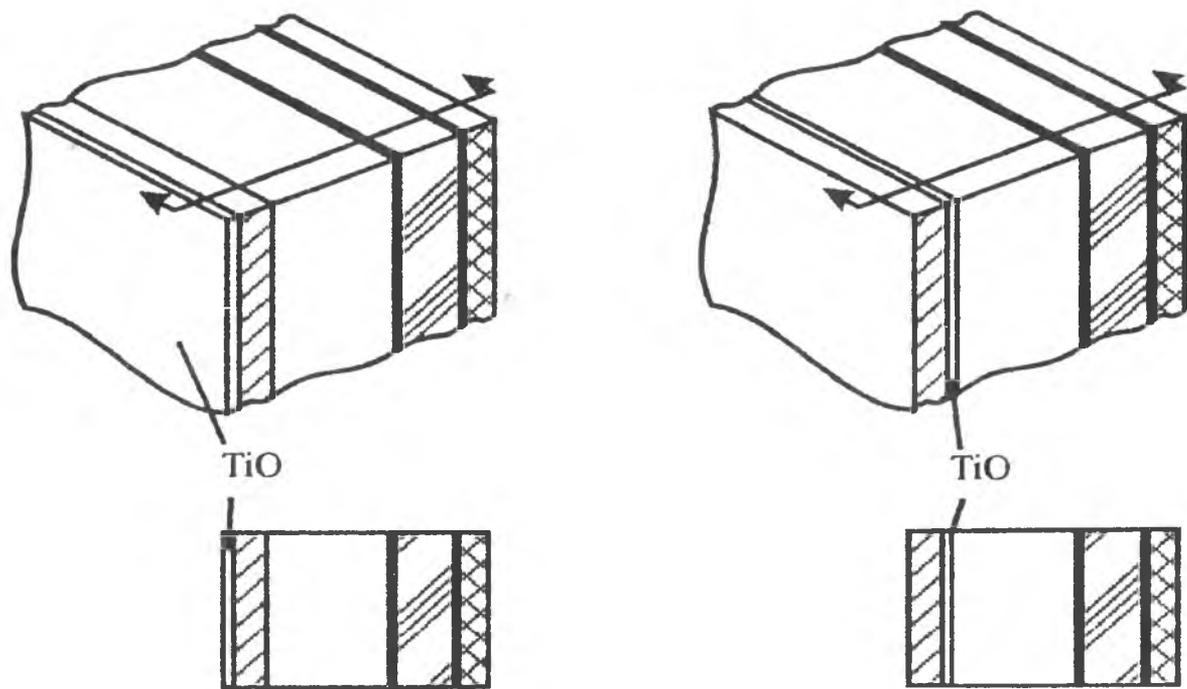


Рис. 4.32. Схемы конструкций с дополнительным резистивным слоем

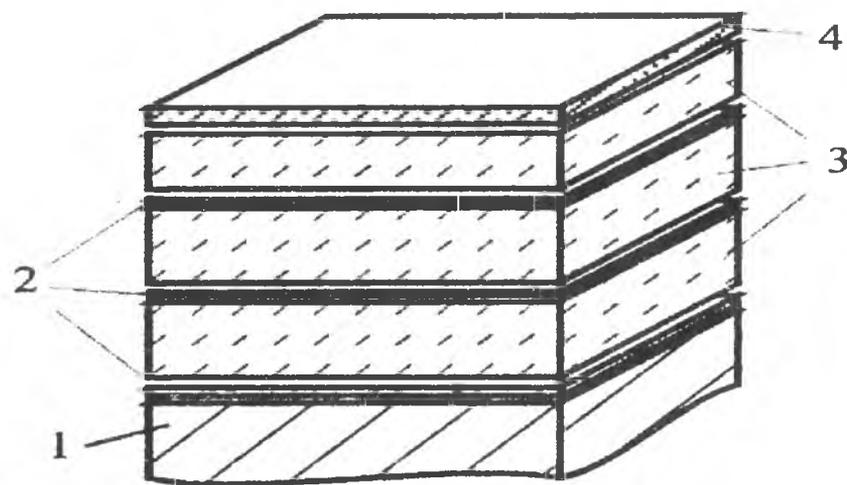


Рис. 4.33. Многослойная конструкция с чередованием слоев:
1 – металлическая основа, 2 – резистивные слои, 3 – диэлектрик, 4 – покрывающий слой

Для создания основы используются сталь, алюминий, медь и другие металлы. Резистивные слои располагаются в порядке убывания характеристического сопротивления: 1500, 540 и 220 Ом и формируются с помощью проводящей пасты, содержащей частицы меди или никеля, причем проводящий слой представляет собой набор диполей с псевдослучайным расположением. Чтобы расширить диапазон рабочих частот, диэлектрические слои изготавливаются из эпоксидных смол, стекловолокна, вспененного полиэтилена и других синтетических пористых материалов, имеющих низкую диэлектрическую проницаемость. Толщина диэлектрического слоя определяется длиной волны, на которой должно быть максимальное поглощение. Слои соединяются между собой с помощью клеев (эпоксидная смола, силикон), а готовая конструкция покрывается слоем радиопрозрачного защитного материала.

В многослойных конструкциях при получении поглощающих электромагнитных экранов в качестве материалов слоев используют композиты. Для производства поглощающего колпака, используемого для защиты персонала,

работающего с полицейскими радарными определения скорости движущихся транспортных средств, применяется материал на основе комбинации пластика с металлом [303]. В качестве поглощающего слоя используют полимерный материал, содержащий металлические частицы, волокна или частицы с металлическим покрытием. Частицы закрепляются в полиэтилене, эпоксидной смоле, полипропилене, полиметилметакрилате, акрилонитрил-бутадиенстироле и т.п. (рис. 4.34).

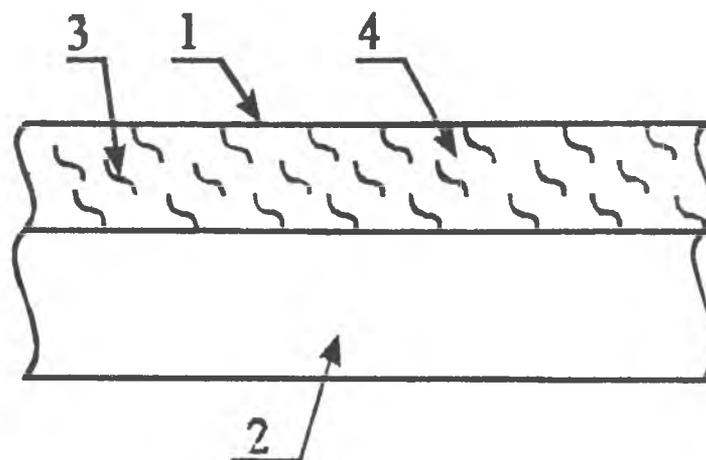


Рис. 4.34. Композитное РПП:

1 – покрытие, 2 – подложка, 3 – металлические частицы или волокна, 4 – связующее

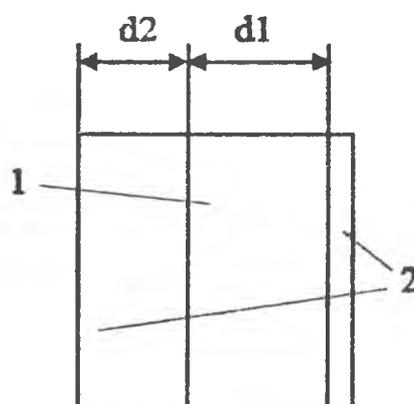


Рис. 4.35. Конструкция трехслойного поглотителя, содержащего магнитные и проводящие слои: 1 – магнитный слой, 2 – проводящие слои

Трехслойный поглотитель, состоящий из проводящих и магнитных слоев, эффективно работает в метровом и дециметровом диапазоне [304]. Магнитный слой, изготовленный из нетканого волокнистого материала или органических и неорганических смол, содержащих магнитный наполнитель, располагается между проводящими слоями (рис. 4.35). В качестве магнитного наполнителя используют измельченный Ni-Zn феррит с размерами частиц около 1 мм в соотношении 70 % масс по отношению к связующему. Частотные зависимости магнитных свойств ферритовой керамики в связующем и без него приведены на рис. 4.36. Один проводящий слой выполнен из смолы с проводящим наполнителем (уголь, алюминий, никель, медь, сталь) в виде частиц или волокон, а другой представляет собой текстильное полотно из металлических волокон. Толщина проводящего и магнитного слоев на основе смол с наполнителем не превышает 0,1 м.

Поглотитель, представленный на рис. 4.34, можно анализировать, используя эквивалентную схему (рис. 4.37 а), параметры которой определяются по формулам:

$$R = Z_0 \frac{w}{C_0} \mu'' d_1, \quad (4.10)$$

$$jwL = Z_0 \frac{w}{C_0} \mu' d_1, \quad (4.11)$$

$$G = \frac{1}{Z_0} \frac{w}{C_0} \epsilon'' d_2, \quad (4.12)$$

$$jwC = \frac{1}{Z_0} \frac{w}{C_0} \epsilon' d_2, \quad (4.13)$$

где Z_0 – волновое сопротивление окружающего пространства,

C_0 – скорость распространения падающей волны,

μ' и μ'' – действительная и мнимая составляющие магнитной проницаемости магнитного слоя,

ϵ' и ϵ'' – действительная и мнимая составляющие диэлектрической проницаемости проводящего слоя,

d_1 и d_2 – толщины магнитного и проводящего слоев соответственно,

w – угловая частота колебаний, равная

$$w = 2\pi f. \quad (4.14)$$

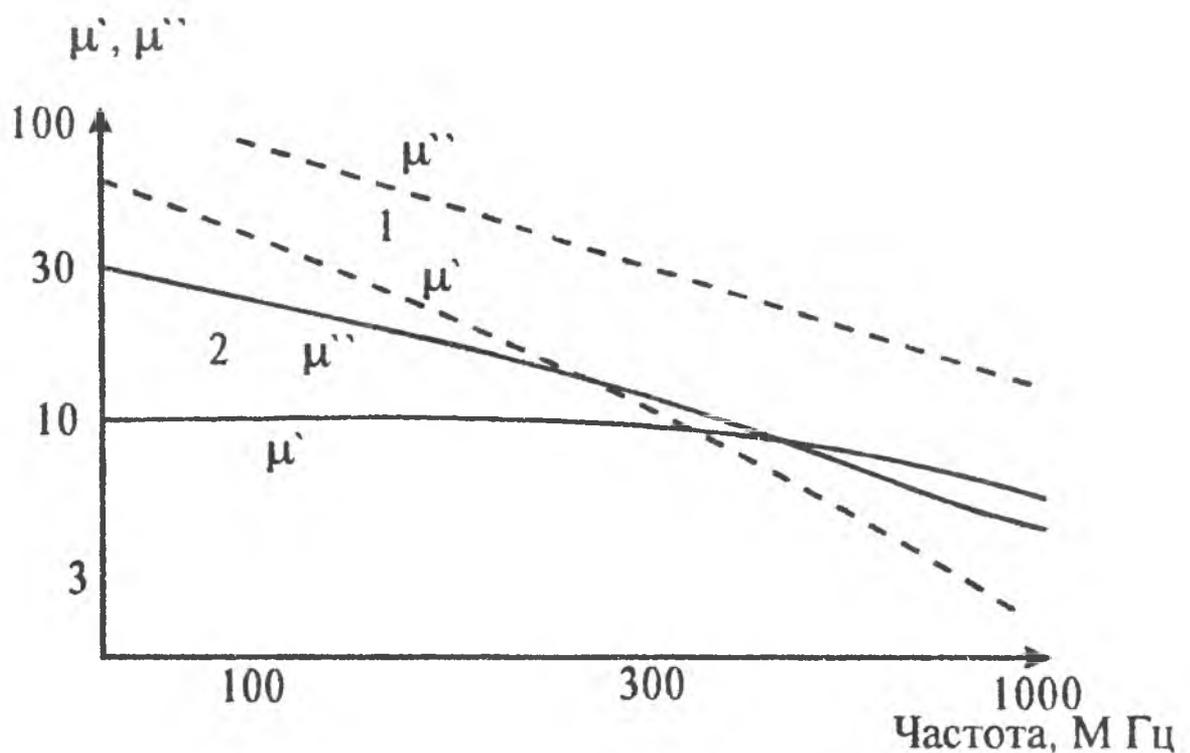
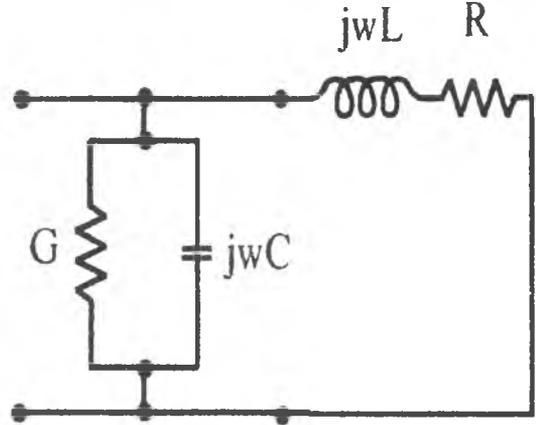


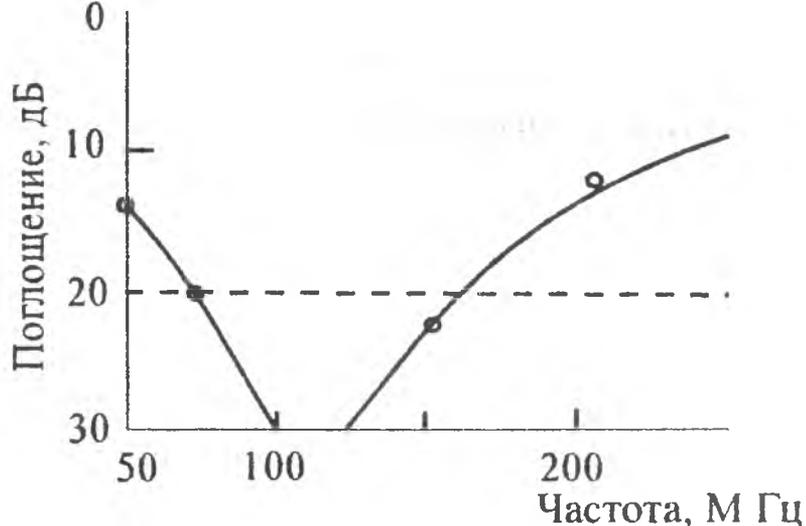
Рис. 4.36. Зависимость магнитных свойств ферритовой керамики от частоты:

1 – ферритовая пенокерамика; 2 – частицы феррита в связующем

При усложнении конструкции каждый проводящий слой можно описывать дополнительным включением параллельной секции, а каждый магнитный – последовательной. Поглощение такой конструкцией носит резонансный характер, а резонансная частота и ширина рабочего диапазона частот зависят от электромагнитных параметров слоев структуры.



а)



б)

Рис. 4.37. Эквивалентная схема а) и частотная характеристика б) поглощения трехслойной конструкции

Интегральная листовая структура, основанная на композитном СВЧ поглощающем материале с повышенной термостойкостью и прочностью содержит: 1) лист из органических и неорганических волокон, погруженных в термоотверждаемую смолу, 2) средний лист из силиконового каучука с угольной сажей, 3) лист из резины с угольными, металлическими волокнами или частицами металла, металлической проволоки (смесь из алюминия, стали, меди и латуни) или металлический лист [305]. В качестве термоотверждаемой смолы используют полиэстер, новолак, фенольные и эпоксидные смолы.

Органические волокна делают из полиэстера, полиамида, акрилонитрила, ароматических полиамидов, поливинилспиртов. Для изготовления неорганических волокон используют алюминий, оксид кремния, карбид кремния, нитрид бора. Волокна приготавливаются в тканой, трикотажной, шторной и нетканой форме со случайной пространственной ориентацией, если используются короткие волокна, и параллельной однонаправленной, - если длинные. Листы изготавливаются все по отдельности и затем склеиваются вместе либо крайние листы, содержащие волокна в отвержденной смоле, соединяются со средним листом из силиконового каучука с угольной сажей, который потом вулканизируется. Такая композитная структура имеет общую толщину около 8,4 мм и обеспечивает поглощение ЭМИ СВЧ диапазона на уровне 14-15 дБ.

В качестве материала первого слоя многослойного РПП для уменьшения коэффициента отражения предпочтительно применять волокнистые материалы [306]. Широкополосный радиопоглотитель, работающий в диапазоне частот 30-400 МГц, содержит, кроме отражающего слоя из стального, медного, никелевого листа и слоя из магнитной керамики (Mn-Zn феррит с поливинилспиртовым связующим), также наружный слой нетканого материала (рис. 4.38). Нетканый материал наполнен магнитным порошком. Наполнение производится несколькими способами: покраска лаком или краской, содержащей магнитный порошок; термическое испарение магнитного материала и напыление его на волокна. Поверхность материала, обращенная к источнику излучения, может быть дополнительно покрыта радиопоглощающим слоем с геометрическими неоднородностями.

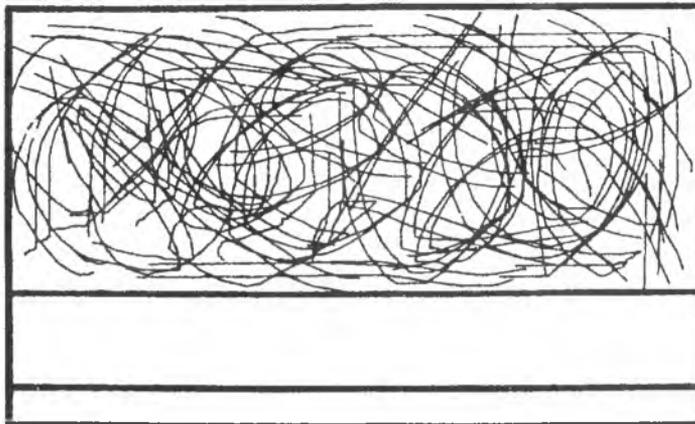


Рис. 4.38. Структура многослойного РПП, содержащего нетканый материал

Фактором, определяющим жесткость многослойных конструкций, часто является жесткость одного или нескольких слоев или основы. Жесткие конструкции нашли широкое применение, они часто используются в статических условиях, не требующих изменения формы РПП, например, в случаях снижения радиолокационной заметности подвижных объектов, поглощения ЭМИ в "безэховых" камерах, создания постоянных поглощающих экранов и фильтров. Однако все чаще возникают проблемы, связанные с необходимостью имитации или маскирования наземных мобильных объектов, доработки серийно выпускаемых РЭС с целью обеспечения требований по защите информации, ЭМС или радиозащиты, для решения которых сложно использовать радиопоглощающие пластины фиксированной формы. Дополнительно при этом необходимо учитывать возможность отражения волн от стыков отдельных кусков РПП. Научную актуальность и большую практическую значимость приобретает проблема создания гибких, эффективных электромагнитных экранов и РПП.

Известно, что радиоволна СВ или ДСВ диапазона, отраженная от стен зданий или металлических конструкций, создает помехи телевизионному приему. Предотвратить этот нежелательный эффект можно путем применения специальной поглощающей конструкции [307]. Данный поглотитель состоит из подложки, на которой закреплены пластины из ферромагнетика. Его общая формула следующая: MFe_2O_4 , где М – металл (Mn, Ni, Co, Mg, Cu, Zn, Cd или смеси ферритовых порошков и карбонильного железа с органическими молекулярными добавками). Пластины находятся на некотором расстоянии одна от другой. Их можно крепить или встраивать непосредственно в железобетонные стены (рис. 4.39).

Для решения аналогичной задачи применен многослойный поглотитель [308]. Подложка выполнена из проводящего материала, на ней закрепили слой феррита с магнитной проницаемостью 500. Далее следует слой диэлектрика, и слой феррита с магнитной проницаемостью 200. Поглощение ЭМИ в рабочем диапазоне частот от 30 до 2500 МГц составляет от -18 до -23 дБ (рис. 4.40).

Многокомпонентные поглощающие панели используются для ослабления отраженного радиосигнала от стен зданий [309]. Панель включает четыре главных элемента: основание, отражающий элемент, поглотитель и внешний защитный элемент. Основание выполнено из структурного материала здания (бетон). Отражающий слой – металлическая сетка, которая экструдируется в бетон. При этом, отражающий слой имеет две функции: отражение ЭМВ и увеличение прочности бетона. Защитный элемент выполнен из кремния, что придает конструкции в целом повышенную

сопротивляемость воздействию климатических факторов. Особенностью является то, что защитный элемент – составная часть поглощающего слоя (рис. 4.41).



Рис. 4.39. Схема поглотителя отраженной радиоволны

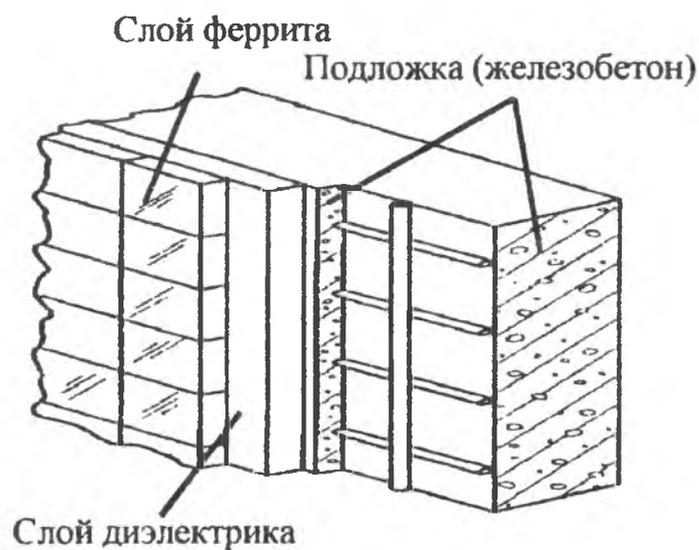


Рис. 4.40. Схема многослойного поглотителя ЭМИ

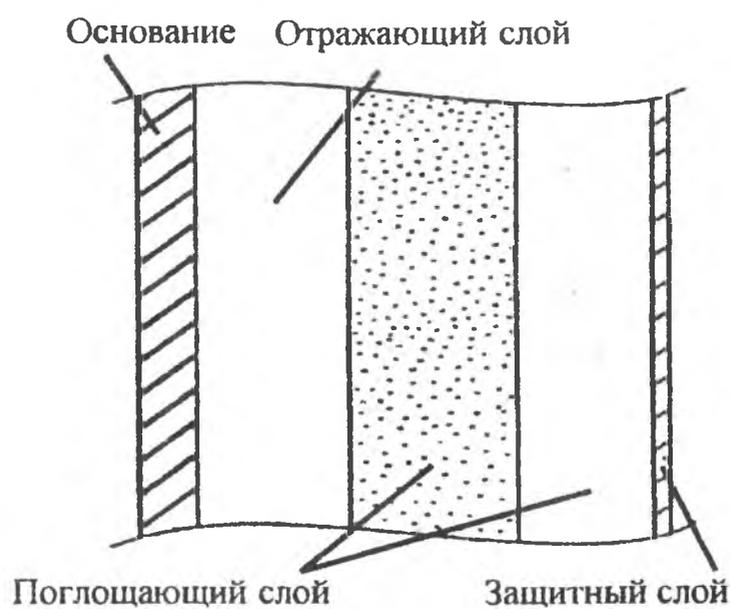
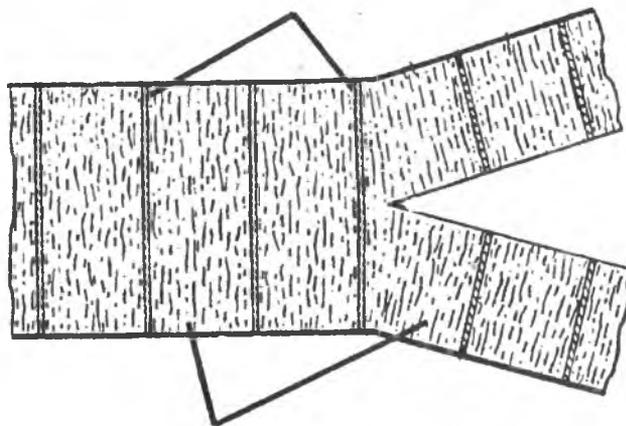


Рис. 4.41. Схема многокомпонентной поглощающей панели

Отраженная волна может стать причиной катастрофы воздушного транспорта. Например, отраженные волны от зданий аэропорта нарушают процесс радиолокационного обнаружения, необходимого для воздушной безопасности. Для избежания этого используется поглотитель [310], состоящий из элементарных участков.

Такие участки представляют собой подложку из алюминия, на которой закреплено множество полос из неорганических волокон, разделенных электрически проводящими компонентами (рис. 4.42).

Электрически проводящий участок



Полосы из неорганических волокон

Рис. 4.42. Схема поглотителя отраженной волны

Системы персонального радиовызова, локальные средне- и высокоскоростные вычислительные сети, использующие в качестве среды распространения радиотракт, для своего функционирования нуждаются в широкополосных поглотителях. Типичный широкополосный материал представляет собой многослойную конструкцию. Первый слой выполнен из проводящего материала, в качестве которого может использоваться Cu, Al, Fe, Ni, нержавеющая сталь, латунь. Для увеличения адгезии промежуточного слоя первый слой может быть обработан или залит компаундом. В качестве основы (первого слоя) может быть использована металлизированная пластмасса. Вторым слоем представляет собой магнитный оксидированный материал, его толщина не превышает 4 мм. Для этого могут быть использованы следующие ферриты: Mn-Zn, Ni-Zn, Mn-Mg-Zn, Li, Mn-Cu-Zn, Ba, Sr, со средней величиной частиц 2-3 мкм. В качестве связующего используют термопласт, терморезистивный органический высокомолекулярный материал или неорганический керамический материал.

Для борьбы с радиочастотными помехами обычно применяются негорючие поглотители ЭМИ, конструкции которых следующие: поглощающий слой, связующее вещество и гибкий проводящий материал. В качестве связующего материала могут быть использованы гипс, кремнекислый кальций, портланд-цемент, глиноземный цемент.

Для защиты от проникновения радиопомех в здания предлагается специальная конструкция окон в виде двух электропроводных оптически прозрачных плоскостей с воздушным заполнением между плоскостями. Проводящие плоскости формируют путем нанесения на тонкий слой сапфира полупроводникового материала. Отражение ЭМИ сформированных плоскостей может быть уменьшено нанесением на них слоем антиотражателя. Эффективность экранирования такой конструкции достигает более 25 дБ в диапазоне частот 2-18 ГГц

5.1. Особенности измерений и анализа цепей в миллиметровом диапазоне длин волн

Особенности измерений и анализа параметров цепей в миллиметровом диапазоне волн и, как следствие, задачи разработки и использования соответствующих скалярных и векторных анализаторов цепей (ВАЦ) требуют учета факторов, специфических для этого диапазона волн и оказывающих существенное влияние на технические и метрологические характеристики таких ВАЦ.

Во-первых, к таким факторам следует отнести большие потери энергии в линиях передачи. Как показывают результаты расчетов, для миллиметрового диапазона длин волн потери мощности в одномодовых металлических волноводах достигают 2 дБ/м при длине волны $\lambda=4$ мм, а при $\lambda=1$ мм они возрастают до 12 дБ/м. Очевидно, что для компенсации этих потерь необходим источник испытательных сигналов с большим уровнем выходной мощности. Выпускаемые промышленностью ГКЧ обычно имеют средний уровень выходной мощности в пределах 5-10 мВт. При среднем значении ослабления в СВЧ тракте (15-25) дБ и необходимом пределе измерения ослабления 60-80 дБ этого уровня выходной мощности ГКЧ явно недостаточно. Для обеспечения требуемого предела измерения необходимо уменьшить ослабление, вносимое СВЧ трактом анализатора цепей, что может быть осуществлено путем лучшего согласования составляющих элементов тракта и/или его существенного конструктивного упрощения. Конструктивное упрощение СВЧ тракта в миллиметровом диапазоне важно также из-за высокой стоимости узлов и элементов, входящих в его состав. Все это накладывает определенные условия и ограничения на выбор соответствующего метода измерения, который должен обеспечивать конструктивную простоту ВАЦ с возможностью получения высоких метрологических характеристик.

Во-вторых, с уменьшением длины волны значительно возрастают фазовые погрешности измерений, обусловленные не повторяемостью устанавливаемого значения частоты при измерении и калибровке, а также от измерения к измерению (как при свипировании частоты, так и при измерениях в «точке») и из-за нестабильности частоты. В общем случае удобнее назвать их «погрешностью из-за неопределенности значения частоты». Эта погрешность может иметь две составляющие: первую, связанную с неопределенностью электрической длины объекта измерения, и вторую, зависящую от частотной характеристики измеряемого параметра.

Количественная оценка абсолютной погрешности измерения фазового сдвига показывает, что при относительной погрешности установки частоты

$\delta f = \pm 0,002$, характерной для большинства ГКЧ, при длине отрезков волновода 10 мм, значение этой погрешности на частоте 100 ГГц достигает $\Delta_{\text{ур}} = \pm 3,0$ град. С увеличением длины отрезка волновода погрешность линейно возрастает.

Третья проблема, возникающая в миллиметровом диапазоне волн, связана с точностью изготовления каналов волноводных элементов измерительного тракта и калибрационных волноводных стандартов (калибровочных мер) в процессе их производства. Проводимые исследования показывают, что фактические размеры каналов волноводов, как правило, превышают номинальные значения, и такая "сверхразмерность" имеет тенденцию к увеличению с ростом частоты, особенно заметную на частотах выше 90 ГГц. Это может привести к серьёзным ошибкам в результатах измерений, если в память анализатора цепей вводится в качестве постоянной величины номинальная расчётная частота среза волновода, а не фактически измеренная, которая может на несколько ГГц отличаться от номинальной.

Говоря о точности изготовления каналов волноводов в коротковолновой части миллиметрового диапазона ($\lambda \leq 2$ мм), необходимо отметить и важность соблюдения формы апертуры волновода, в частности, во фланцах, так как наличие деформаций, скруглений углов, других искажений контура и т.п. отрицательно сказывается на результатах измерений.

В-четвёртых, очень серьёзной проблемой, от решения которой во многом зависит достоверность результатов измерений на миллиметровых волнах, является проблема волноводных фланцевых соединений, проблема допусков на основные присоединительные размеры фланцев. Эти допуски должны составлять порядка ± 10 мкм при длине волны $\lambda = 4$ мм и единиц мкм при $\lambda = 1$ мм. Можно показать, что для волновода сечением 2,4x1,2 мм при допуске вдоль оси волновода порядка $\pm 2 \cdot 10^{-2}$ мм погрешность измерения фазы составляет порядка ± 10 град. Для той же погрешности нестыковка фланцев должна быть не более $\pm 5 \cdot 10^{-2}$ мм. Зазор во фланцах, кроме того, приводит к появлению неоднородности и изменяет условия согласования. Поэтому для уменьшения этой погрешности необходимо минимизировать количество фланцевых соединений измерительного тракта, что также взаимосвязано с конструктивным упрощением СВЧ тракта, и, кроме того, по возможности использовать прецизионные фланцы с более жёсткими допусками на основные присоединительные размеры. В первую очередь это относится к фланцам волноводных элементов измерительного тракта и к фланцам калибрационных стандартов.

С проблемой допусков тесно смыкается задача обеспечения неподвижности и жесткости измерительного тракта при подключении объектов измерения и калибрационных стандартов (калибровочных мер). Даже небольшая механическая деформация тракта (порядка десятков мкм) может привести к значительным погрешностям измерений. Решение этой проблемы

связано с конструктивными и технологическими задачами, но оно также предполагает желательность исключения каких-либо механических коммутаторов в каналах измерительного СВЧ тракта, которые снижают быстродействие измерителя и не могут быть учтены алгоритмом калибровки.

К числу других проблем следует отнести также трудности метрологической аттестации ВАЦ миллиметрового диапазона, связанные с необходимостью создания и аттестации соответствующих образцовых мер и средств измерений. К точности изготовления каналов волноводных образцовых мер и их фланцев должны предъявляться гораздо более жёсткие требования по геометрии и допускам, чем к обычным элементам СВЧ тракта, о чём уже упоминалось выше. Так, "сверхразмерный" волноводный компонент, используемый в качестве калибрационной меры, может вызвать заметное изменение дисперсии, учитываемой анализатором цепей, и привести к неправильной модели волноводных потерь. Сдвиг между стыковочными плоскостями тракта и калибрационной меры за счёт допусков на присоединительные размеры фланцев в процессе калибровки может привести к паразитным пульсациям в данных измерений, которые могут заметно повлиять, например, на уровень измерений потерь на отражение и т.п.

Обобщая выше изложенное, можно заключить, что для успешного решения задачи построения ВАЦ в миллиметровом диапазоне волн необходимо применять такие методы измерений, решающие основные измерительные задачи, которые позволяют максимально упростить СВЧ тракт, минимизировать количество фланцевых соединений, использовать прецизионные по точности изготовления компоненты измерительного тракта и средства калибровки, использовать прецизионные фланцы, а также исключить, по возможности, применение СВЧ переключателей.

5.2. Инструментальный анализ СВЧ цепей в миллиметровом диапазоне волн

5.2.1. Измеряемые "цепные" параметры СВЧ устройств

Математическим аппаратом теоретического анализа СВЧ цепей и их соединений являются матричные и топологические методы, причём для матричного описания СВЧ устройства могут использоваться различные системы параметров (Z , Y , A , G , H , T , R , S), между которыми существует однозначная связь. Наличие такой связи делает, строго говоря, выбор той или иной системы параметров для описания СВЧ устройства непринципиальным. Однако, широкое применение на практике нашли далеко не все эти параметры. Связано это с рядом обстоятельств и, в первую очередь, с возможностью экспериментального определения и физической интерпретации используемых параметров. При теоретическом анализе и расчётах разнообразных СВЧ

устройств и соединений наиболее предпочтительным оказалось применение системы S-параметров, являющихся элементами матрицы рассеяния, описывающей анализируемое устройство или соединение. В некоторых случаях, например, при анализе каскадных соединений СВЧ устройств, удобно использовать T (или R)-параметры, легко выражаемые через S-параметры. Практика показала, что и при экспериментальных исследованиях и измерениях параметров СВЧ устройств наиболее предпочтительным также является использование системы S-параметров и некоторых дополнительных параметров, производных от них. При анализе СВЧ устройств топологическими методами (методом ориентированных графов) для описания графов также преимущественно используются S-параметры.

Напомним, что S-параметры связывают падающие на i -входы СВЧ устройства волны a_i и отражённые (рассеянные) от них волны b_i , где $i = 1, 2, \dots, n$ (n – число пар полюсов эквивалентного СВЧ устройству $2n$ – полюсника).

Связь падающих и отражённых (сходящихся и расходящихся) волн в общем случае может быть выражена в виде:

$$b_i(\omega) = \sum_{k=1}^n S_{ik}(\omega) a_k(\omega), \quad (5.1)$$

где $k = 1, 2, \dots, n$.

или в матричном виде:

$$[b] = [S][a]. \quad (5.2)$$

В общем случае S-параметры являются комплексными величинами, зависящими от частоты.

Параметры S_{ii} определяют коэффициенты отражения на соответствующих i - входах, а параметры $S_{ij} (i \neq j)$ – коэффициенты передачи между i - м и j - м плечами эквивалентного многополюсника.

Итак, основными "цепными" параметрами СВЧ устройств, подлежащими измерению, в общем случае являются:

модули коэффициентов отражения $|S_{ii}|$;

фазы коэффициентов отражения $\arg S_{ii}$;

модули коэффициентов передачи между плечами (входами и выходами) устройства $|S_{ik}|$;

фазы коэффициентов передачи $\arg S_{ik}$;

А также производные от них параметры, такие как коэффициент стоячей волны по напряжению i -го плеча:

$$K_i = \frac{1 + |S_{ii}|}{1 - |S_{ii}|} \quad (5.3)$$

Вносимое ослабление между плечами $i-k$:

$$A_{ik} = 20 \lg |S_{ki}|; \quad (5.4)$$

Полное входное сопротивление Z_{ii} и проводимость Y_{ii} со стороны i -го плеча:

$$Z_{ii} = \frac{1}{Y_{ii}} = Z_{0i} \frac{1 + S_{ii}}{1 - S_{ii}}; \quad (5.5)$$

Время задержки, или групповое время запаздывания, при прохождении сигнала между плечами $i-k$:

$$\tau_{ik} = \frac{d}{d\omega} (\arg S_{ki}); \quad (5.6)$$

Невзаимный фазовый сдвиг между плечами $i-k$:

$$\alpha_{ik} = \arg S_{ki} - \arg S_{ik}; \quad (5.7)$$

И некоторые другие параметры (неравномерность ГВЗ и т.п.).

Следует отметить, что в общем случае параметры рассеяния S_{ik} являются функциями не только частоты ω , но и времени t , отсчитываемого с момента поступления падающих волн $a_i(\omega)$ на входные полюса многополюсника, и уровней мощности падающих волн:

$$P_i = \frac{|a_i|^2}{Z_{0i}}. \quad (5.8)$$

5.2.2. Измерительные задачи анализа СВЧ цепей

Разнообразие СВЧ изделий и устройств, используемых в современных радиоэлектронных системах, средствах и аппаратуре, предназначенных для работы в различных условиях, на разных типах линий передач и в различных

частотных диапазонах, охватывающих длины волн от дециметра до долей миллиметра, предопределяет многообразие измерительных задач, которые необходимо решать в процессе их создания, исследований и при определении соответствия их параметров и характеристик требованиям спецификаций в процессе промышленного выпуска и эксплуатации.

К основным измерительным задачам анализа СВЧ устройств, решаемых с помощью различных средств инструментального анализа, можно отнести следующие.

Анализ линейных пассивных устройств. К обширному классу устройств, наиболее широко используемых в СВЧ технике, в первую очередь следует отнести пассивные линейные СВЧ устройства, т.е. устройства, не содержащие усилители или источники СВЧ мощности, у которых их внешние характеристики не зависят от уровня падающей (проходящей) СВЧ мощности (этот уровень, естественно, должен оставаться в определённых границах, например, не превышать пределов электрической прочности входящих элементов). Поэтому к числу наиболее распространённых измерительных задач, связанных с анализом СВЧ цепей, относятся традиционные задачи измерения S-параметров (и производных от них параметров) пассивных линейных СВЧ устройств в соответствующих рабочих диапазонах частот.

Анализ нелинейных устройств. Следующую весьма значительную группу СВЧ устройств составляют разнообразные нелинейные СВЧ устройства.

При измерении характеристик нелинейных СВЧ устройств должен быть обеспечен определённый уровень мощности падающих волн $a_k(\omega)$, определяющих режим работы исследуемого устройства, что усложняет измерительную задачу.

С учётом специфики реальных нелинейных СВЧ устройств и возможностей измерительных средств выделяют следующие основные измерительные задачи при анализе нелинейных цепей:

Измерение частотных характеристик S-параметров $S_{ik}(\omega)$ маломощных нелинейных устройств в линейном режиме, т.е. при уровнях мощности на входе устройства:

$$P_{BX} \leq (10^{-5} - 10^{-7}) \quad (5.9)$$

Измерение $S_{ik}(\omega)$ полупроводниковых устройств на средних уровнях мощности на их входах:

$$P_{BX} \approx (10^{-3} - 10^{-1}) \quad (5.10)$$

Измерение $S_{ik}(\omega)$ мощных СВЧ устройств при:

$$P_{BX} \geq 1 \quad (5.11)$$

Измерение амплитудных характеристик (определение уровня компрессии):

$$S_{ik}(\omega, a_k) = S(\omega_0, P_{BX}). \quad (5.12)$$

Анализ частотно-избирательных и сверхширокополосных устройств. Специфические требования могут возникать при измерениях и анализе частотно-избирательных и сверхширокополосных СВЧ устройств.

Используемые и вновь создаваемые СВЧ приборы, системы, устройства часто включает в себя разнообразные элементы и узлы, которые отличаются либо частотной сверхузкополосностью, либо, наоборот, частотной сверхширокополосностью, что требует соответствующего учёта специфики измерительных задач при исследовании их характеристик и соответствующих возможностей используемых измерительных средств.

Обычно к сверхузкополосным устройствам относят те, у которых:

$$\frac{\Delta f}{f_H} \leq 10^{-3}; \quad (5.13)$$

К сверхширокополосным устройствам относят такие, у которых:

$$\frac{\Delta f}{f_H} \geq k, \quad (5.14)$$

где Δf – полоса рабочих частот устройства,

f_H – начальная частота рабочей полосы устройства,

k – коэффициент перекрытия рабочей полосы частот, который, принимает значения в зависимости от частотной области измерений (например, в сантиметровом диапазоне для $f_H \geq 1$ ГГц обычно $k \approx 10$, а в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн для $f_H \geq 60$ ГГц это будет величина $k \approx 1-2,5$).

Анализ во временной области. Анализ СВЧ устройств во временной области даёт возможность получить дополнительную информацию о их внутренней структуре. Для перехода во временную область используется частотно-временное преобразование (обратное преобразование Фурье) измеренной частотной характеристики устройства. К задачам анализа во временной области также относятся:

Определение временного отклика нелинейного устройства на импульсный сигнал заданной формы и амплитуды, т.е. задачу определения $b_{ik}(t)$ при:

$$a_k(\omega, t) = \sum_{m=0}^{\infty} a_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} m + \varphi_m\right), \quad (5.15)$$

Определение составляющих $S_{ik}(\omega, t)$:

$$S_{ik}(\omega, t) = \sum_{l=0}^{\infty} S_l(\omega) e^{-j\omega\tau_l}, \quad (5.16)$$

где $S_l(\omega)$ – комплексные амплитуды и τ_l – времена задержки отдельных спектральных составляющих $S_{ik}(\omega)$.

Сравнительный анализ параметров и характеристик СВЧ устройств. При создании некоторых систем и изделий, например, фазированных систем, необходимо иметь возможность сравнивать между собой (или с эталоном) ряд устройств. В связи с этим возникает задача измерения неидентичности двух устройств, которая чаще всего предполагает измерение неидентичностей частотных зависимостей ослаблений $\Delta A(\omega)$ и фаз $\Delta\varphi(\omega)$, определяемых как:

$$\Delta A(\omega) = 20 \lg \left| \frac{S_1(\omega)}{S_2(\omega)} \right|, \quad (5.17)$$

$$\Delta\varphi = \arg S_1(\omega) - \arg S_2(\omega), \quad (5.18)$$

где $S_1(\omega)$ и $S_2(\omega)$ – комплексные коэффициенты передачи сличаемых устройств.

5.3. Измерение характеристик на фиксированной частоте

5.3.1. Измерение коэффициента отражения

Наиболее простые и доступные методы измерения коэффициента отражения основаны на применении измерительной линии, представляющей собой отрезок линии передачи с узкой щелью, прорезанной вдоль ее оси. Через щель внутрь волновода помещен электрический зонд, соединенный с детектором и передвигаемый вдоль щели с помощью каретки.

Промышленностью выпускаются измерительные линии коаксиальной, прямоугольной и симметрично-полосковой конструкции. Для проведения

калибровки и ряда измерений комплект содержит короткозамыкатель и согласованную нагрузку. Коаксиальные измерительные линии, используемые на частотах 10-10000 МГц, имеют собственный $K_{ст} = 2-3$, при этом погрешность составляет не более 10 %. Волноводные измерительные линии имеют прямоугольное сечение, используются на частотах 1000 МГц и выше, имеют собственный $K_{ст} = 1,01 - 1,03$ и погрешность измерения $K_{ст} = 2 - 3$ не более 7 %. Фактически диапазон $K_{ст}$, измеряемых с помощью приведенных измерительных линий, значительно шире указываемых в паспорте на линию. Измерение малых $K_{ст}$ ограничено собственным $K_{ст}$ измерительной линии. Измерение больших $K_{ст}$ связано с трудностями измерения большого диапазона амплитуд электрического поля, а также с отражениями от зонда, которые малы в минимуме, но велики в точках максимума. При работе с линией следует использовать чувствительные индикаторы (микроамперметры и измерительные усилители). В этих условиях обеспечивается квадратичность характеристики детектора и исключаются трудности, связанные с ее учетом.

При измерениях коэффициента отражения измерительная линия включается в состав стенда. В процессе измерений, передвигая зонд, снимают картину распределения электрического поля вдоль линии. Перемещение зонда измерительной линии калибровано, и его положение отсчитывается с помощью специальной линейки или микрометрического устройства. Расстояние между двумя соседними минимумами равно половине длины волны в используемой измерительной линии. Положение минимумов определяет фазу коэффициента отражения измеряемого устройства, а отношение максимума к минимуму электрического поля определяет коэффициент стоячей волны: $K_{ст} = E_{max}/E_{min}$.

С помощью $K_{ст}$ определяют модуль коэффициента отражения, поскольку он равен

$$\Gamma = (K_{ст} - 1)/(K_{ст} + 1). \quad (5.19)$$

Заметим, что на практике больше принято использовать не модуль коэффициента отражения, а коэффициент стоячей волны. Объясняется это отсутствием дополнительных расчетов, более удобными числовыми величинами, непосредственной связью с физическим представлением о стоячей волне и, наконец, давно укоренившимися традициями.

5.3.2. Измерение коэффициента стоячей волны (модуля коэффициента отражения)

Величины $K_{ст}$, указанные в паспорте на измерительную линию, определяют непосредственным измерением минимального A_{min} и максимального A_{max} показаний индикатора при перемещении каретки вдоль линии и вычисляют по формуле

$$K_{\text{ст}} = \sqrt{A_{\text{max}} / A_{\text{min}}} \quad (5.20)$$

При измерении больших $K_{\text{ст}}$ рекомендуется использовать метод удвоенного минимума, основанный на измерении ширины кривой распределения напряженности электрической составляющей поля вблизи минимума стоячей волны в линии. Порядок измерения следующий: определяют отклонение индикатора при помещении зонда измерительной линии в минимуме A_{min} , а затем измеряют интервал смещения зонда $2\Delta l$ между теми его соседними положениями, в которых отклонение индикатора равно $2A_{\text{min}}$, а коэффициент $K_{\text{ст}}$ вычисляется по формуле

$$K_{\text{ст}} = \lambda_{\text{в}} / 2\pi\Delta l \quad (5.21)$$

5.3.3. Измерение фазы коэффициента отражения

Фазу коэффициента отражения определяют измерением положения минимума стоячей волны электрического поля. Если за плоскость измерений (начало отсчета) принять вход в нагрузку, то фаза в минимуме стоячей волны в линии вычисляется по уравнению

$$\varphi_{\text{min}} = -(2n - 1)\pi = \varphi_0 - 4\pi l_{\text{min}} / \lambda_{\text{в}} \quad (5.22)$$

Решая это уравнение относительно фазы в плоскости измерения φ_0 , получаем

$$\varphi_0 = 4\pi l_{\text{min}} / \lambda_{\text{в}} - (2n - 1)\pi, \quad (5.23)$$

где l_{min} – расстояние от плоскости измерения до минимума;

n – порядковый номер минимума, начиная от плоскости измерения.

Таким образом, задача измерения фазы заключается в определении длины волны в измерительном тракте $\lambda_{\text{в}}$, равной удвоенному расстоянию между соседними минимумами, в вычислении расстояния от минимума до нагрузки l_{min} и нахождении порядкового номера минимума n . Последний определяется как целая часть числа, полученного из уравнения $n = 1 + 2l_{\text{min}} / \lambda_{\text{в}}$.

5.3.4. Измерение модуля коэффициента передачи

Модуль и фаза (аргумент) коэффициента передачи имеют самостоятельное значение и измеряются отдельно. В случае уменьшения амплитуды волны модуль коэффициента передачи определяет затухание и в случае увеличения амплитуды волны – усиление. Аргумент коэффициента

передачи определяет изменение фазы волны при прохождении ее через измеряемое устройство и используется для оценки фазовых характеристик СВЧ-устройств.

Измерение модуля коэффициента передачи можно проводить следующими наиболее распространенными методами: измерительной линии, резонатора, отношения мощностей, замещения и компенсационным.

Метод измерительной линии используется для измерения малых затуханий (порядка нескольких децибел) и основан на измерении четырехполюсника, короткозамкнутого на выходном конце. Измерив $K_{ст}$, можно вычислить затухание четырехполюсника

$$\alpha = 8,68 \operatorname{arctg} 1/K_{ст}. \quad (5.24)$$

Это соотношение справедливо, если затухание в самой измерительной линии меньше затухания в измеряемом четырехполюснике и нет отражений от входа последнего.

Метод резонатора удобен для определения затуханий менее 1дБ в небольших отрезках линий передачи. Линию достаточной длины закорачивают с обоих концов или сворачивают в кольцо с таким расчетом, чтобы образовать резонатор, и тогда измеряют собственную добротность полученного резонатора. По результатам измерения добротности Q_0 вычисляется коэффициент затухания линии передачи, который с достаточной степенью точности можно определить соотношением

$$\alpha = 27,3/Q_0 \lambda_v. \quad (5.25)$$

Эта формула справедлива лишь для резонаторов небольшой электрической длины (например полволны) с малыми потерями в местах короткого замыкания и при слабой связи во время измерений с генератором и индикатором.

Метод отношения мощностей основан на измерении мощности на входе $P_{вх}$ и выходе $P_{вых}$ измеряемого устройства и вычислении модуля коэффициента передачи (затухания или усиления)

$$\alpha = 10 \lg(P_{вх}/P_{вых}). \quad (5.26)$$

В методе используется точный образцовый аттенюатор, включенный между генератором и выходным индикатором. Аттенюатор первоначально устанавливается на некоторый удобный уровень, принимаемый в качестве опорного. После включения измеряемого четырехполюсника затухание аттенюатора изменяется до тех пор, пока детектируемый сигнал не достигает первоначального значения.

По изменению показаний аттенюатора определяют модуль коэффициента передачи (затухание или усиление) четырехполосника. Оба последних метода используются при измерениях затухания больше нескольких децибел.

5.3.5. Измерение фазы коэффициента передачи

Фазовый угол коэффициента передачи обычно находят как изменение фазы (фазовый сдвиг) сигнала на выходе по сравнению с фазой сигнала на входе измеряемого устройства.

Большинство измерительных устройств используют метод замещения по СВЧ и промежуточной частоте, компенсационный метод или метод фазовых детекторов.

Функциональная схема для измерения комплексного значения коэффициента передачи компенсационным методом содержит образцовый аттенюатор, образцовый фазовращатель, генератор синусоидальных сигналов и индикатор. Отсчет по шкалам аттенюатора и фазовращателя дает значения модуля и фазового угла комплексного коэффициента передачи измеряемого устройства. Отсчет начинают после того, как с помощью регулировки аттенюатора и фазовращателя индикатор покажет нуль, что соответствует равенству амплитуд и фаз выходных сигналов в обеих параллельных ветвях.

Автоматизированные и автоматические измерители коэффициентов отражения и передачи делятся на две группы. К первой группе относятся панорамные измерители модулей коэффициентов отражения и передачи, а ко второй – измерители S-параметров. Под S-параметрами следует понимать комплексные значения коэффициентов отражения и передачи.

Более широкое применение находят панорамные измерители, так как в большинстве случаев СВЧ-устройства достаточно полно характеризуются значениями модуля коэффициента отражения, который принято представлять через коэффициент стоячей волны. В качестве основного измерительного устройства в панорамном измерителе модулей коэффициентов отражения применяются рефлектометры (два направленных ответвителя с детекторными головками).

При измерении коэффициента отражения к измерителю отношений подводят выходные сигналы рефлектометра, один из которых пропорционален мощности падающей волны, а другой – мощности отраженной волны. Это позволяет получить на выходе измерителя отношений сигнал, пропорциональный модулю коэффициента отражения. При измерении коэффициента передачи к выходу измеряемого устройства вместо согласованной нагрузки подключают широкополосную детекторную головку, выходной сигнал которой подается на вход измерителя отношений вместо сигнала направленного ответвителя обратной волны. В данном случае сигнал на

выходе измерителя отношений пропорционален модулю коэффициента передачи. Выходной сигнал измерителя отношений подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа. Для калибровки вертикальной оси используются образцовые нагрузки и аттенюаторы. Сигнал направленного ответвителя падающей волны используется для автоматической регулировки (стабилизации) мощности свипируемого генератора. Для формирования напряжения развертки от свипируемого генератора поступает сигнал перестройки частоты. С целью калибровки оси частот (горизонтальной) сигнал (импульс) с выхода волномера после соответствующей обработки (сужения) подается на модулирующий электрод осциллографической трубки для подсвета экрана в момент совпадения частоты настройки волномера и частоты генератора.

Измерители S-параметров являются установками, построенными на несколько иных принципах и, как правило, включающими электронную вычислительную машину. Последнее позволяет повысить точность и степень автоматизации измерений, а также улучшить форму представления и осуществить запоминание информации.

5.4. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн. Классификация и принципы построения.

5.4.1. Некоторые общие требования к измерителям параметров цепей миллиметрового диапазона волн

Наряду с решением измерительных задач в нужных динамических и частотных диапазонах измерения, к анализаторам СВЧ цепей, в том числе к ВАЦ, предъявляется ряд других общих требований.

Важнейшим из них при векторном анализе СВЧ цепей в миллиметровом диапазоне волн является обеспечение нужных точностей измерения параметров испытываемых устройств. Практика СВЧ измерений, подтверждающая постоянный рост требований к параметрам СВЧ устройств, делает весьма актуальной задачу повышения точностей измерения, которая решается как за счёт улучшения параметров элементов измерительной схемы, ужесточения допусков на геометрические размеры волноводных устройств измерительной схемы, так и за счёт разработки уточнённых моделей ошибок, усовершенствованных методов и средств калибровки, применения цифровых методов обработки, хранения и представления измерительной информации.

Поскольку анализаторы СВЧ цепей являются средствами измерений (измерительными приборами или информационно-измерительными системами), к ним предъявляются требования метрологической обеспеченности основных видов измерений соответствующими образцовыми средствами, эталонами и

методиками аттестации, а также верификационными средствами и методиками поверки в процессе эксплуатации.

Важным требованием является многофункциональность анализаторов, возможность решения ими многих измерительных задач из числа перечисленных выше. При необходимости проведения многочисленных однотипных измерений с высокой производительностью (как в случае с ФАР или СВЧ микросборками) целесообразно на базе многофункциональных измерителей создавать специализированные АИС. Повышение производительности измерений напрямую связано с автоматизацией измерителей.

Огромные достижения в области создания высокопроизводительных, с большой памятью и недорогих средств вычислительной техники, в первую очередь персональных компьютеров (ПК), а также наработки разнообразных пакетов соответствующего программного обеспечения, позволяющих осуществлять обработку измерительной информации и её представление практически в режиме реального времени, дают возможность использовать (встраивать) эти вычислительные средства (ПК) непосредственно в измерительные комплексы, существенно повышая эффективность работы измерителей и улучшая удобства работы с ними. Применение во вновь создаваемых анализаторах СВЧ цепей ПК становится, по существу, также общим требованием.

Широкий круг существующих и потенциальных потребителей измерителей параметров цепей миллиметровых волн, всё возрастающее разнообразие объектов измерений и рост объёмов измерений делают актуальной и задачу создания достаточно массовых и недорогих векторных анализаторов параметров цепей, выполняющих основные типы измерительных задач с достаточно высокой точностью и производительностью. К этому классу измерителей относят так называемые гомодинные векторные анализаторы цепей, которым уделяется основное внимание в данной работе.

До появления промышленных разработок таких измерителей для целей измерения в одномодовых волноводах различных "цепных" параметров (полных сопротивлений и КСВН, вносимых ослаблений, фазовых характеристик отражения и передачи и т.п.) было разработано большое число методов и приборов, каждый из которых имеет свои преимущества и области применения. Приведём краткий ретроспективный анализ основных методов и средств инструментального анализа параметров СВЧ цепей, ориентируясь преимущественно на миллиметровый диапазон волн.

5.4.2. Типы и классификация векторных анализаторов цепей

Так как S-параметры СВЧ устройств являются комплексными величинами, то все возможные методы их измерения могут быть определены

как амплитудно-фазовые. Информационно-измерительные системы или приборы, предназначенные для измерения комплексных S-параметров СВЧ устройств, называют измерителями S-параметров или векторными анализаторами цепей, поскольку любой комплексный параметр может быть представлен соответствующим вектором, характеризуемым своими амплитудой и фазой, зависящими от частоты измерения.

При построении векторных анализаторов цепей необходимо учитывать следующие принципиальные моменты.

1) Чтобы получить информацию об S-параметрах, исследуемое устройство необходимо включить в измерительный тракт прибора и подать на него СВЧ сигнал, промодулированный по какому-то параметру (амплитуде, частоте или фазе). Сигнал, прошедший через исследуемое устройство или отражённый от него, несёт полезную информацию о его свойствах, для извлечения которой необходимо этот измерительный сигнал сравнить с некоторым исходным (опорным) сигналом. Следовательно, схема анализатора цепей должна содержать измерительный и опорный каналы и преобразователь информационных сигналов. При этом реализация любого метода измерения фаз S-параметров требует сравнения неизвестной фазы измерительного сигнала (отражённого от испытываемого устройства либо прошедшего через него) с фазой некоего когерентного опорного сигнала. Такое сравнение может, осуществлено путём интерференции и преобразования измерительного и опорного сигналов на нелинейном элементе - первичном преобразователе СВЧ сигналов. Следовательно, все возможные модификации векторных анализаторов цепей по существу представляют собой интерферометры, основу СВЧ измерительного тракта которых образует мостовая схема с опорным и измерительными каналами.

2) Возможным и часто используемым способом получения информации об измеряемых амплитудно-фазовых характеристиках S-параметров является формирование квадратурных, т.е. сдвинутых по фазе на $\pi/2$, сигналов, обработка которых позволяет извлечь информацию как об амплитудно-частотных, так и фазо-частотных зависимостях исследуемых S-параметров.

3) Для определения характеристик разнообразных исследуемых СВЧ устройств в их полных рабочих диапазонах частот необходимо, чтобы векторный анализатор цепей позволял проводить измерения в достаточно широких и регулируемых полосах частот с отображением информации на экране монитора, т.е. проводить панорамные измерения с возможностью регулирования ширины частотной полосы просмотра и измерения интересующих характеристик.

4) Векторные анализаторы СВЧ цепей, являясь измерительными приборами, должны гарантировать необходимые точности измерения исследуемых параметров испытываемых устройств, т.е. должны быть

метрологически обеспечены соответствующими методиками и средствами калибровки и поверки.

5) Современные требования к информационно-измерительным системам и приборам, к которым относятся векторные анализаторы цепей, включают в себя и требования автоматизации измерений, применения цифровых методов обработки, хранения и представления получаемой измерительной информации.

Конкретный вид схемы СВЧ измерительного тракта в значительной степени определяет и структуру векторного анализатора цепей в целом. При этом конкретные используемые схемы СВЧ измерительных трактов (волноводных, коаксиальных и др.) могут быть дифференцированы независимо от используемых методов измерения S-параметров, а на основе исключительно лишь требований к характеристикам ВАЦ.

Универсальным классификационным признаком СВЧ трактов ВАЦ и самих ВАЦ является число полюсов (число входов/выходов) схемы СВЧ тракта. Это число определяется, во-первых, номенклатурой объектов измерений, среди которых могут быть только двухполюсные устройства, либо устройства, представляемые эквивалентными двухполюсниками и четырёхполюсниками, которые в свою очередь могут быть как взаимными, так и невзаимными, либо в общем случае представляться эквивалентными многополюсниками. Если объектом измерений является многополюсник, то он может быть трансформирован в двухполюсник или четырёхполюсник путём подключения к соответствующим его выходам согласованных нагрузок. Во-вторых, число полюсов определяется требованиями к объёму исходной измерительной информации, т.е. к числу выходных сигналов первичных преобразователей, от которого зависят функциональные возможности и метрологические характеристики ВАЦ.

При классификации ВАЦ по числу полюсов принято два полюса относить к входу ВАЦ со стороны источника измерительных сигналов, в качестве которого обычно используют генераторы качающейся частоты, два - к выходу ВАЦ для подключения двухполюсника и ещё два - для подключения четырёхполюсника. Остальное число полюсов определяется количеством и типом первичных преобразователей СВЧ сигналов.

Большинство известных схем ВАЦ имеет измерительные тракты, характеризующиеся числом полюсов от 6 до 14.

В качестве других классификационных признаков ВАЦ могут служить:
характер выходных сигналов используемых первичных измерительных преобразователей ВАЦ;

используемые способы модуляции измерительного и опорного сигналов;

используемые методы формирования квадратурных сигналов измерительной информации и др.

Рассмотрим первый из перечисленных признаков - характер выходных сигналов первичных преобразователей. Этот признак даёт возможность подразделить все возможные методы измерения S-параметров и, соответственно, структуры ВАЦ на две большие группы:

1) Методы с детектированием интерференционного СВЧ сигнала, полученного первоначально от одного источника сигнала (одного ГКЧ) и расщеплённого далее в СВЧ тракте анализатора на опорный и измерительный сигналы - эти методы являются основой для построения гомодинных ВАЦ;

2) Методы с преобразованием частоты измерительного и опорного сигналов, имеющих разные частоты и полученных от разных источников. При этом источник измерительного сигнала принято называть измерительным генератором, а источник опорного сигнала (другой частоты) - гетеродином. Первичными преобразователями ВАЦ, реализующих эти методы, являются уже не детекторы, а смесители, с помощью которых информация о значениях измеряемых S-параметров переносится из диапазона СВЧ в диапазон промежуточных (низких) частот. Эти методы принято также называть методами с переносом частоты и они являются основой построения гетеродинных ВАЦ.

Необходимо при этом отметить следующее обстоятельство. При анализе работы гомодинных и гетеродинных анализаторов цепей выходные сигналы первичных преобразователей определяются (рассчитываются) на основе обычных методов классической теории детектирования и преобразования частоты сигналов. При этом не имеет никакого значения, каким путём при преобразовании частоты получен опорный сигнал - от отдельного гетеродина или же посредством модуляции опорного и измерительного сигналов, полученных от одного источника и разнесённых по частоте на величину, равную промежуточной частоте, за счёт модуляции. Поэтому некоторые модификации гомодинных ВАЦ являются по существу гибридными анализаторами цепей: с одной стороны, это одnogенераторные, т.е. гомодинные ВАЦ, а с другой, по принципу получения выходных сигналов первичных преобразователей, они могут быть отнесены к анализаторам цепей с переносом частоты. Сами первичные преобразователи в таких схемах анализаторов по существу являются смесителями, часто по традиции называемые гомодинными детекторами. Характеристики подобных гибридных анализаторов цепей приближаются к характеристикам гетеродинных ВАЦ, но в то же время они проще по конструкции и дешевле.

В схемах гомодинных анализаторов СВЧ цепей могут использоваться различные виды модуляции опорного или измерительного сигналов (амплитудная, частотная, фазовая модуляция или манипуляция), применяются различные виды модуляции одновременно и опорного и измерительного сигналов, известны схемы, в которых модуляция опорного и измерительного сигналов вообще отсутствует, а обработка информации об измеряемых S-параметрах осуществляется на постоянном токе. Подробнее схемы ВАЦ с

различными видами модуляции опорного и измерительного сигналов рассматриваются далее в разделе настоящей главы.

В схемах ВАЦ используют и различные способы формирования квадратурных сигналов измерительной информации (аппаратурные, схемные, программные и др.), которые рассматриваются подробно далее в главе.

5.4.3. Гетеродинные векторные анализаторы цепей

Гетеродинные векторные анализаторы СВЧ цепей - это измерители S-параметров, использующие частотное преобразование исходных СВЧ сигналов - измерительного и опорного, полученных от разных источников, в информационные низкочастотные сигналы, измерение амплитудных и фазовых соотношений которых позволяет получить нужную информацию о комплексных S-параметрах исследуемого устройства.

Структурные схемы двухканального гетеродинного преобразователя СВЧ сигналов и гетеродинного ВАЦ представлены на рис. 5.1 - 5.2.

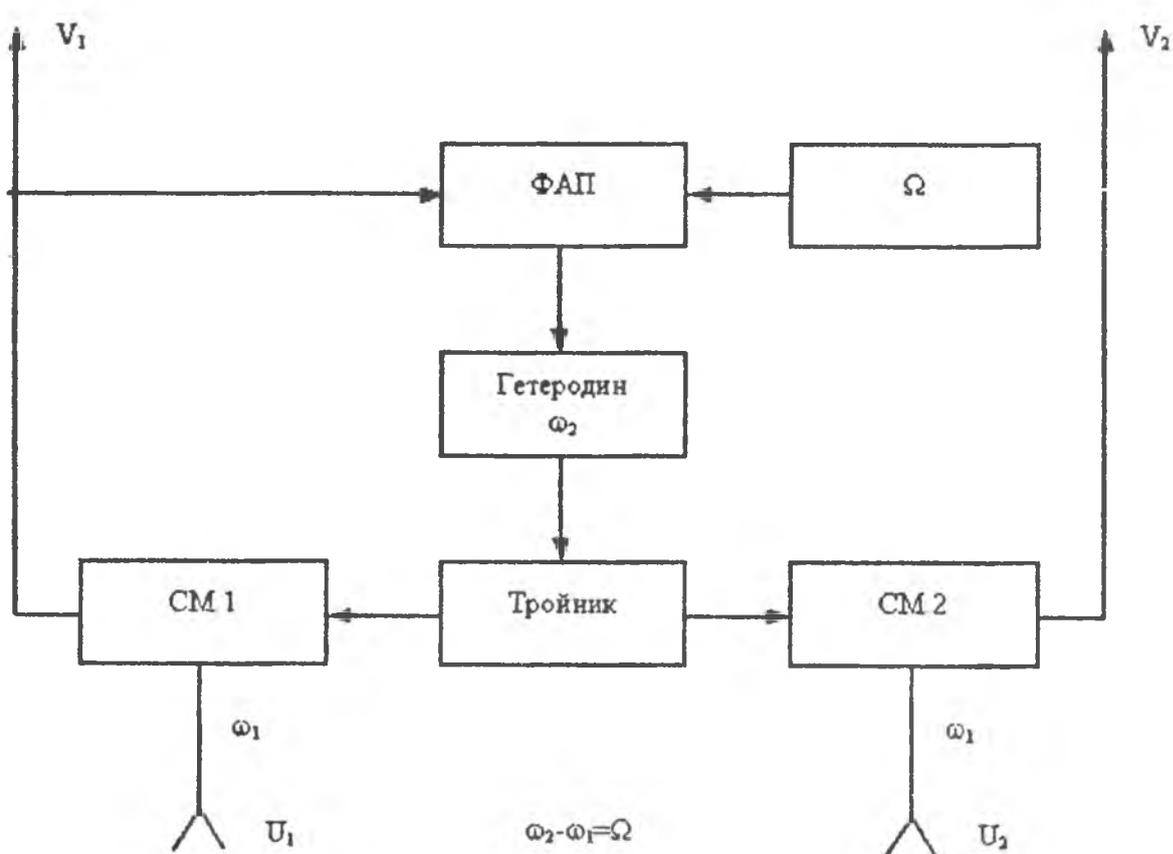


Рис. 5.1. Структурная схема двухканального гетеродинного преобразователя СВЧ сигналов

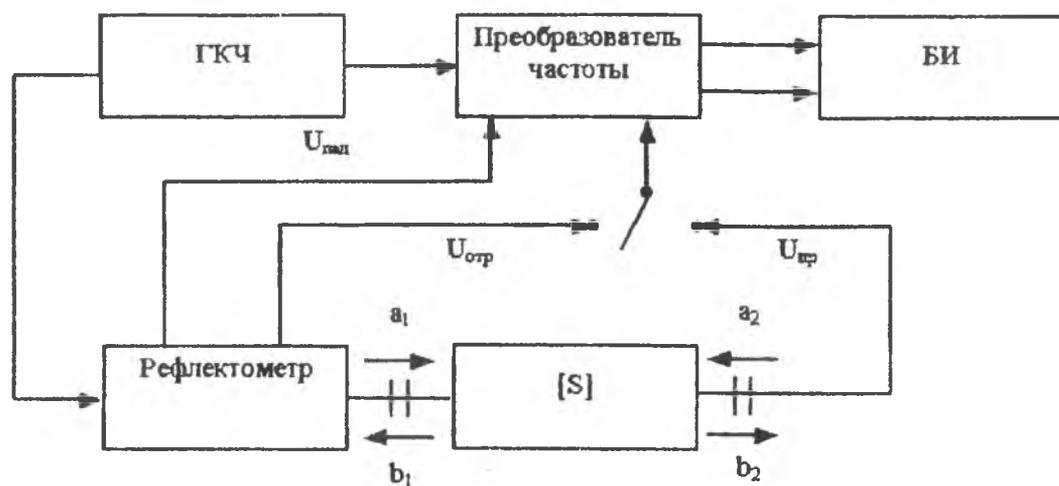


Рис. 5.2. Структурная схема гетеродинного ВАЦ

В таких анализаторах входные СВЧ информационные сигналы частоты ω_1 равные:

$$\begin{cases} U_1 = V_0 \cos \omega_1 t, \\ U_2 = V_0 \rho \cos(\omega_1 t + \varphi), \end{cases} \quad (5.26)$$

где ρ и φ - модуль и фаза измеряемого параметра,

Гетеродинный преобразователь линейно трансформирует в напряжение низкой промежуточной частоты Ω :

$$\begin{cases} V_1 = m_1 V_0 \cos \Omega t, \\ V_2 = m_2 V_0 \cos(\Omega t + \varphi). \end{cases} \quad (5.27)$$

При этом важным требованием, предъявляемым к гетеродинным ВАЦ, является постоянство частоты Ω выходных напряжений, которое обеспечивается с помощью системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) гетеродина под частоту входного сигнала опорного канала U_1 .

К достоинствам гетеродинных ВАЦ следует отнести высокую чувствительность по уровню входных сигналов (порядка $10^{-12} - 10^{-14}$ Вт) и избирательность по спектру частот входных сигналов, большие пределы измеряемых ослаблений (до -80 - 100 дБ), широкие функциональные возможности (обеспечивают измерения комплексных значений S-параметров, КСВН, ослаблений, полных сопротивлений и проводимостей линейных и нелинейных устройств, измерения ГВЗ, измерения узкополосных и широкополосных устройств и др.), хорошие метрологические характеристики, в том числе высокая разрешающая способность по амплитуде (0.001 дБ) и фазе (0.01 град).

Однако, указанные достоинства гетеродинных ВАЦ обеспечиваются за счёт большой сложности схемы (например, для получения нужных характеристик в качестве и источника, и гетеродина используют дорогостоящие

синтезаторы частоты и т.п.), а сами измерители являются весьма дорогостоящими установками. Основным недостатком гетеродинных преобразователей измерительных СВЧ сигналов является сложность создания широкополосных гетеродинов, двухканальных смесителей и систем ФАПЧ, обеспечивающих выполнение условия:

$$\omega_1 - \omega_2 = \text{const.} \quad (5.28)$$

К недостаткам таких измерителей следует отнести и относительно малое быстродействие, что не позволяет использовать их в режиме времени, близком к реальному.

Примером ВАЦ гетеродинного типа в миллиметровом диапазоне волн являются системы типа 8510XF фирмы Hewlett-Packard, работающие в диапазоне до 110 ГГц.

Высокая стоимость и сложность ВАЦ, построенных на основе метода переноса частоты, ухудшение параметров при попытке упрощения их схемы, отсутствие стабильных источников СВЧ сигнала и широкополосных преобразователей частоты - всё это предопределяет интерес к ВАЦ гомодинного типа особенно при решении измерительных задач в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн (3-2 мм и короче).

5.4.4. Гомодинные векторные анализаторы цепей. Методы измерений в зависимости от модуляции опорного и измерительного сигналов

Схема с отсутствием модуляции сигналов. При построении схем гомодинных ВАЦ могут быть использованы различные варианты модуляции опорного и измерительного сигналов и, прежде всего, возможен вариант, когда модуляция СВЧ сигналов (опорного и измерительного) может вообще отсутствовать, а обработка информации об измеряемых S-параметрах осуществляется на постоянном токе [311]. Этот путь используется при разработке простых и дешёвых гомодинных ВАЦ, которые, однако, не могут сравниться по своим характеристикам с гетеродинными ВАЦ.

Основным недостатком таких анализаторов является сложность алгоритмов калибровки и измерений, не позволяющих реализовать панорамный режим измерений, малые пределы измеряемых ослаблений (не более 40 дБ) и необходимость использования генератора с повышенным уровнем выходной мощности (более 20 мВт).

Поскольку данный вариант не является перспективным, далее на нём не останавливаемся.

Схема с амплитудной модуляцией СВЧ сигнала в самом источнике. Следующий способ построения схемы гомодинного ВАЦ основан на использовании амплитудной модуляции СВЧ сигнала в самом источнике [312].

В используемых типах измерительных генераторов амплитудная модуляция осуществляется обычно модулирующим напряжением типа "меандр". Это достаточно эффективный путь повышения чувствительности и расширения динамического диапазона ВАЦ, но он имеет свои принципиальные ограничения из-за наличия составляющей, пропорциональной мощности опорного сигнала. Эта составляющая не позволяет измерять уровень полезного интерференционного сигнала, меньший опорного. Поэтому динамический диапазон анализатора хотя и расширяется, но не превышает 40 дБ.

Выходные сигналы первичных преобразователей при такой модуляции содержат нелинейные члены, которые существенно усложняют алгоритмы калибровки и обработки измерительной информации.

Данный вариант построения схемы гомодинного ВАЦ с точки зрения достижимых параметров также не относится к перспективным.

Другие методы измерения S -параметров с детектированием СВЧ сигналов предполагают модуляцию СВЧ сигналов в каналах (трактах) анализаторов цепей. Это может быть как амплитудная (АМ), так и фазовая модуляция (ФМ).

Схема с амплитудной модуляцией в измерительном канале. Метод Шафера-Кона. Шафером [313] было предложено модулировать по амплитуде только СВЧ сигнал в измерительном канале. Этот метод, первоначально названный методом с модулированной поднесущей (сигнал в измерительном канале был назван модулированной поднесущей в отличие от немодулированной несущей в опорном канале) и был далее развит Коном [314].

Основное достоинство метода - устранение в продетектированном сигнале составляющей, пропорциональной только мощности опорного сигнала и ограничивающей динамический диапазон анализатора с модуляцией сигнала источника (генератора). Действительно, эта составляющая при модуляции в канале представляет собой напряжение постоянного тока и отфильтровывается селективным усилителем, настроенным на частоту модуляции Ω . Кроме того, если реализуется балансная АМ измерительного сигнала, то за счёт подавления несущей становится пренебрежимо малым в интерференционном сигнале и нелинейный член. Выражение для продетектированного напряжения, определяющего модуль $|S_x|$ и аргумент φ_x измеряемого S -параметра становится предельно простым:

$$U_1 = 2\alpha K_1 K_2 E_0^2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) \cos \Omega t, \quad (5.29)$$

где K_1, K_2 – модули суммарных коэффициентов передачи цепей (каналов) распространения опорного и измерительного сигналов от точки разветвления тракта до детектора, имеющего коэффициент передачи α ;

φ_H – фазовый сдвиг, учитывающий неидентичность фазочастотных характеристик (ФЧХ) этих цепей.

Напряжение обозначено через U_1 , так как оно пропорционально только вещественной части измеряемого параметра S_x . Для определения модуля $|S_x|$ и фазы φ_x необходимо дополнительно иметь выражение вида:

$$U_2 \equiv |S_x| \sin(\varphi_x + \varphi_H) \cos \Omega t, \quad (5.30)$$

Т.е. необходимо иметь дополнительно квадратурный (сдвинутый на $\pi/2$ относительно U_1) сигнал. Детектор, выходное напряжение которого определяется выражением (5.29) или (5.30) получил название скалярного гомодинного детектора (СГД).

При осуществлении балансной АМ измерительного сигнала есть два пути создания гибридных ВАЦ.

Во-первых, это однополосная модуляция измерительного сигнала с подавлением несущей, осуществляемая посредством двойных балансных или модуляторов с одной боковой полосой (ОБП). Такие модуляторы весьма распространены в технике СВЧ. Их достоинство – достаточно высокое быстродействие, поскольку они базируются на диодах Шотки или $p-i-n$ диодах. Основной недостаток таких модуляторов с ОБП – недостаточно высокое (до 20 дБ при необходимости иметь не менее 40 дБ) подавление второй боковой полосы из-за неидентичности частотных характеристик каналов модулятора. Этот недостаток заметно проявляется в широкополосных ВАЦ миллиметрового диапазона. Возможным способом преодоления этого недостатка модуляторов является автоматическая коррекция неидентичности частотных характеристик каналов модулятора аппаратно-программным путём.

Во-вторых, при балансной АМ измерительного сигнала можно применить в качестве первичных преобразователей СВЧ сигналов двойные балансные смесители с подавлением сигнала зеркального канала. Такие смесители также хорошо известны в технике СВЧ. Они аналогичны по своей структуре и результирующему эффекту модуляторам с ОБП, но и недостатки у них такие же. В данном случае они проявляются в недостаточном подавлении сигнала зеркального канала.

Устройства, типа двойных балансных смесителей с подавлением сигнала зеркального канала в отличие от скалярных гомодинных детекторов (СГД) получили название векторных гомодинных детекторов (ВГД) [315]. Целью различных схемных реализаций ВГД является получение вместо напряжений (5.29) и (5.30), формируемых по отдельности, одного напряжения вида:

$$U = \alpha K_1 K_2 |S_x| E_0^2 \cos[\Omega t + (\varphi_x + \varphi_H)]. \quad (5.31)$$

Напряжение аналогично выходному напряжению смесителя гетеродинного анализатора цепей. По своей информативности оно эквивалентно выходным напряжениям (5.29) и (5.30), получаемых с помощью двух СГД, поэтому и было введено понятие ВГД.

Исторически развитие метода Шафера-Кона шло по пути уменьшения начального уровня измерительного сигнала по сравнению с опорным. Тогда нелинейным членом в выходных напряжениях СГД можно пренебречь, не увеличивая существенно погрешности измерения $|S_x|$ даже при небалансной АМ. Этот путь, рекомендованный Коном, ограничивает динамический диапазон анализатора цепей и соответственно пределы измерения $|S_x|$. Чтобы избежать этого ограничения, было предложено использовать двойную амплитудную модуляцию измерительного сигнала с различными частотами модуляции, а обработку измерительной информации осуществлять на разностной частоте модуляции. В результате пределы измерения удаётся расширить до 70 дБ.

Интересная модификация метода Шафера-Кона была предложена И. Чупровым [316]. Поскольку нелинейный член в выходных напряжениях СГД устранить при обычной АМ без существенного (как минимум на 20 дБ) уменьшения начального уровня измерительного сигнала по отношению к опорному не удаётся, было предложено учитывать его с помощью дополнительного напряжения частоты F_M , пропорционального величине $|S_x|^2$. Оно обеспечивается с помощью дополнительного преобразователя СВЧ сигнала, включаемого в измерительный канал. Исходная система нелинейных уравнений при учёте этого напряжения линейризуется и решается, следовательно, значительно проще. Однако неидентичность амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) СГД и дополнительного преобразователя вносит свои погрешности, в результате пределы измерения $|S_x|$ удаётся расширить только до 60 дБ.

Измерительный тракт гомодинного ВАЦ с модуляцией измерительного сигнала. Обобщённая структурная схема измерительного тракта гомодинного анализатора цепей с модуляцией измерительного сигнала приведена на рис. 5.3.

Если источник СВЧ сигнала (ГКЧ) выдаёт амплитудно-модулированный сигнал с частотой модуляции Ω , то выходное напряжение СГД описывается следующим выражением:

$$U = \alpha E_0^2 \left[K_1^2 + 2K_1 K_2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) + K_2^2 |S_x|^2 \right] \cos \Omega t. \quad (5.32)$$

Из данного выражения видно, что наличие первого члена существенно ограничивает возможности измерения малых информационных сигналов, определяемых вторым и третьим членами, а наличие третьего члена существенно усложняет алгоритм обработки измерительной информации, так как возникает задача решения системы нелинейных уравнений. Поэтому возникает естественное желание освободиться от первого и третьего членов в уравнении (5.32).

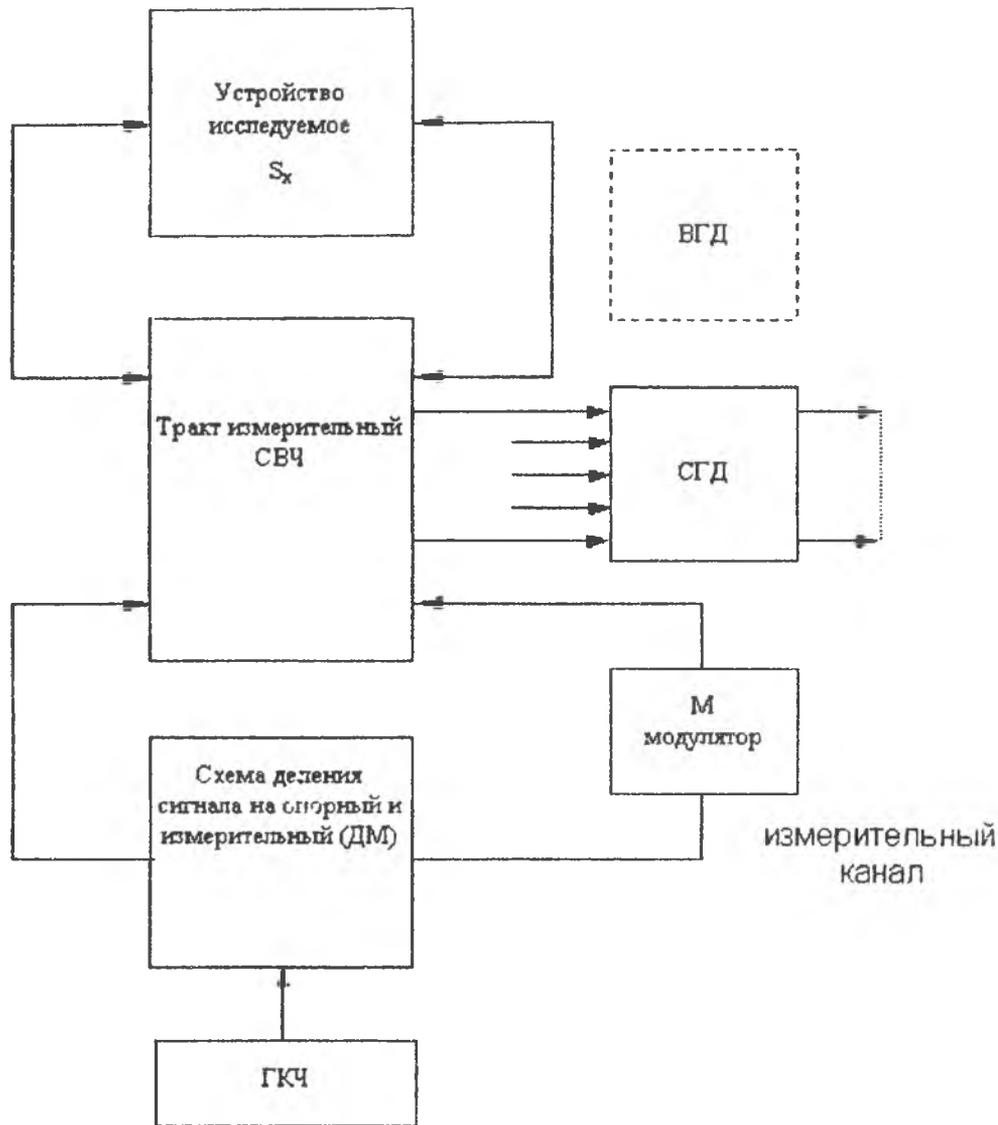


Рис. 5.3. Структурная схема измерительного СВЧ тракта с модуляцией измерительного сигнала

Как было сказано, первый шаг в этом направлении был сделан Коном, который предложил модулировать только выходной сигнал измерительного канала (модулированная поднесущая). В этом случае интерференционный сигнал определяется выражением:

$$U = \alpha M E_0^2 \left[2K_1 K_2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) + K_2^2 |S_x|^2 \right] \cos \Omega t, \quad (5.33)$$

где M – коэффициент амплитудной модуляции.

Действительно, продетектированный выходной сигнал опорного канала, определяемый первым членом выражения (5.32), представляет собой

напряжение постоянного тока и отфильтровывается (не пропускается) селективным усилителем, настроенным на частоту Ω .

Второй шаг также был сделан Коном и заключается в использовании балансной амплитудной модуляции измерительного сигнала, при которой третий член в выражении (5.32) становится пренебрежимо малым.

Запишем основные выражения для этого случая.

Как известно [317], измерительный сигнал U_m , представляющий АМ сигнал с балансной модуляцией, описывается выражением:

$$U_m = K_2 E_0 \frac{M}{2} |S_x| \left[\cos(\omega_0 t + \Omega t + \varphi_x + \varphi_m) + \cos(\omega_0 t - \Omega t + \varphi_x + \varphi_m) \right], \quad (5.34)$$

где φ_m – фаза измерительного сигнала.

В опорном канале, где нет модуляции, сигнал U_r описывается выражением:

$$U_r = K_1 E_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_r), \quad (5.35)$$

где φ_r – фаза опорного сигнала.

Результирующий интерференционный сигнал при балансной амплитудной модуляции измерительного сигнала тогда имеет вид:

$$U = \alpha M K_1 K_2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) \cos \Omega t, \quad (5.36)$$

где $\varphi_H = \varphi_m - \varphi_r$.

Получить сигнал вида (5.36) из выражения (5.32) можно другим способом, применив вместо обычного СГД балансный смеситель. В этом случае выражение (5.36) будет отличаться только наличием соответствующего коэффициента пропорциональности.

5.4.5. Схемы с линейной фазовой модуляцией и фазовой манипуляцией измерительного сигнала

Наряду с амплитудной модуляцией измерительного сигнала одним из первых классических способов, применённых в гомодинных анализаторах цепей, стал способ с применением фазовой модуляции (ФМ) или фазовой манипуляции (ФМП) измерительного сигнала. Широко известно применение линейной фазовой модуляции измерительного сигнала в пределах от 0 до 2π , осуществляемой с помощью электромеханических фазовращателей Фокса или их аналогов – ферритовых вращателей поляризации (например, фазовращатели Фокса используются в установках для измерения ослабления и калибровки

аттенюаторов миллиметрового диапазона волн типа ДК1-15 в диапазоне частот 37,5–78,3 ГГц, а электрические фазовращатели, модулируемые линейно по закону "пилы", в установках типа ДК1-19 и ДК1-21 в диапазонах частот 78,33–118,1 ГГц и 129,2–142,8 ГГц соответственно). Периодическое изменение фазы измерительного сигнала в пределах $0 - 2\pi$ по линейному закону, как известно, эквивалентно сдвигу частоты этого сигнала на величину, равную скорости изменения фазы. По существу это однополосная модуляция измерительного сигнала, что и необходимо при создании гомодинных ВАЦ. Такие анализаторы цепей могут быть реализованы без особых проблем в коротковолновой части миллиметрового диапазона волн. Однако, при этом необходимо отметить как недостаток фазовращателей Фокса то обстоятельство, что они не позволяют получить большие скорости изменения фазы и соответственно большие сдвиги частоты измерительного сигнала - обычно это десятки и сотни герц.

Общепринятым значением частоты измерительного сигнала является 100 кГц, на которой в современных анализаторах цепей производится обработка измерительной информации. Частота 100 кГц является достаточно оптимальной, так как на этой частоте, с одной стороны, может быть достигнута высокая скорость обработки информации, обеспечивающая реальный масштаб времени при исследовании характеристик S-параметров, а с другой - влияние шумов вида $1/f$ достаточно минимизировано.

В отличие от электромеханических фазовращателей Фокса современные электрические ферритовые фазовращатели обеспечивают возможность линейной модуляции с частотами в несколько десятков килогерц (до 100 кГц) в диапазонах частот до 180 ГГц и могут быть использованы при построении схем ВАЦ. Такие фазовые модуляторы использованы, в частности, в ВАЦ R4206, R4204, R4203 и R4202 фирмы Elmika (Литва). Отметим только, что изготовление таких ферритовых фазовращателей представляет собой достаточно серьёзную технологическую задачу.

Другой способ предполагает дискретную фазовую манипуляцию измерительного сигнала по алгоритму $0/\pi$. Известно [318], что такая фазовая манипуляция эквивалентна балансной АМ со спектром выходного сигнала, равным:

$$E(t) = \frac{2}{\pi} E_0 \left[\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t + \frac{1}{3} \cos(\omega_0 + 3\Omega)t - \frac{1}{3} \cos(\omega_0 - 3\Omega)t + \dots \right], \quad (5.3)$$

где $\Omega = 2\pi F$ соответствует частоте F коммутации фазы измерительного сигнала с амплитудой E_0 , причём коммутирующее напряжение, определяющее спектр (5.30), должно быть "меандром".

Как и в случае с балансной АМ, в спектре отсутствует несущая, за счёт подавления которой в интерференционном сигнале становится пренебрежимо малым нелинейный член.

Сопоставление выражения (5.30) с выражением, описывающим спектр сигнала при балансной АМ, показывает, во-первых, что даже при коэффициенте амплитудной модуляции $M=1$ соотношение амплитуд первых (полезных) боковых полос сигналов равно $\frac{4}{\pi} \approx 1,27$ и благодаря этому расширяется динамический диапазон анализатора цепей с фазовой манипуляцией по алгоритму $\frac{0}{\pi}$.

Во-вторых, отклонение коммутируемого фазового сдвига от 180° в меньшей степени влияет на уровень подавления несущей, чем неидентичность характеристик плеч балансного амплитудного модулятора.

Отметим, что в настоящее время разработаны бинарные фазовращатели на $p-i-n$ диодах в диапазоне до 110-120 ГГц. Они обладают достаточно высокой скоростью, надёжностью и хорошими эксплуатационными параметрами (не чувствительны к статическому электричеству, не требуют дополнительных питающих напряжений и имеют значительно меньшие габариты, чем балансные модуляторы).

При использовании фазовой манипуляции по алгоритму $\frac{0}{\pi}$ алгоритмы калибровки и измерения подобны случаю балансной АМ.

Всё сказанное позволяет сделать вывод о полной конкурентноспособности этого способа модуляции с балансной АМ и перспективности его использования в схемах ВАЦ миллиметрового диапазона волн.

Возможно, применение в схемах ВАЦ и дискретной фазовой манипуляции по алгоритму $0-\frac{\pi}{2}$. Этот случай соответствует небалансной АМ, при этом спектр выходного сигнала описывается выражением:

$$E(t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E_0 \left[\frac{1}{2} \cos \omega_0 t - \cos(\omega_0 + \Omega)t + \cos(\omega_0 - \Omega)t - \frac{1}{3} \cos(\omega_0 + 3\Omega)t + \frac{1}{3} \cos(\omega_0 - 3\Omega)t + \dots \right] \quad (5.38)$$

Как видно из (5.31), уровень несущей в выходном сигнале не превышает $0,707 E_0$, а в случае небалансной АМ он был бы равен E_0 , что также говорит о преимуществе фазовой манипуляции.

5.4.6. Схема с модуляцией опорного сигнала

Среди различных способов модуляции сигналов в гомодинных анализаторах цепей следует отметить и случай, когда модулируется только

опорный сигнал [319]. Модуляция может осуществляться как по амплитуде, так и по фазе этого сигнала.

При модуляции опорного сигнала продетектированный сигнал содержит постоянную составляющую, пропорциональную $|S_x|$, которая отфильтровывается селективным усилителем. Но при этом в продетектированном сигнале присутствует составляющая, пропорциональная мощности опорного сигнала.

Для обычной АМ возможным способом исключения этой нежелательной составляющей является предложение использовать в качестве компенсирующего напряжение датчика системы автоматической регулировки мощности (АРМ) ГКЧ, которое также пропорционально мощности опорного сигнала. Датчик системы АРМ включается в опорный канал и решает, таким образом, две задачи. Возможен и вариант включения в схему специального двухканального программируемого усилителя со схемой вычитания, который исключает из результатов измерений неидентичность АЧХ датчика системы АРМ и СГД. На практике не удаётся подавить полностью или учесть алгоритмически нежелательную составляющую, поэтому обычный предел измерения $|S_x|$ не превышает 40 дБ.

Схема гомодинного анализатора с использованием линейной фазовой модуляции (по закону "пилы") опорного сигнала в миллиметровом диапазоне волн применена в установках измерения ослабления и калибровки аттенюаторов типа ДК1-15, ДК1-15/1, ДК1-19 и ДК1-21 (от 37,5 до 142,8 ГГц).

Принцип действия таких установок основан на преобразовании сигнала миллиметрового диапазона в сигнал фиксированной промежуточной частоты и измерения ослабления проверяемого четырёхполюсника посредством замещения ослабления четырёхполюсника на рабочей частоте ослаблением образцового аттенюатора на промежуточной фиксированной частоте (рис. 5.4).

Динамический диапазон измеряемых этими установками ослаблений - от 0 до 80 дБ. Точность измерения коэффициентов передачи составляет от 0,15 до 1,22 дБ.

Установки позволяют измерять фазовые сдвиги в пределах от 0 до 360 градусов с погрешностью 0,6–3,1 град.

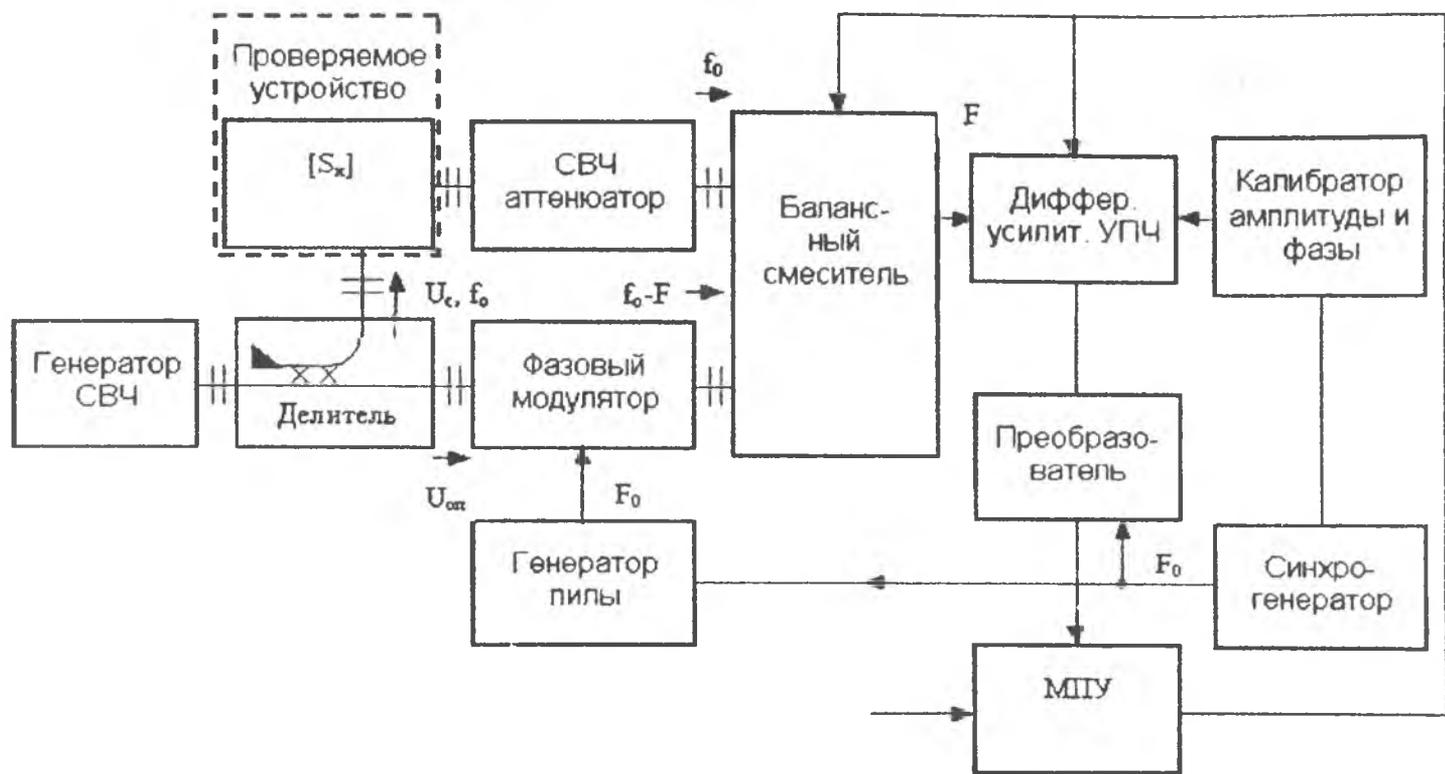


Рис. 5.4. Структурная схема гомодинного измерителя ослаблений с фазовой модуляцией опорного сигнала

5.4.7. Гомодинные схемы с одновременной модуляцией измерительного и опорного сигналов

Схемы с одновременной модуляцией как опорного, так и измерительного сигнала позволяют объединить достоинства, свойственные методам модуляции только измерительного и только опорного сигналов. Метод позволяет получить результирующий сигнал, свободный от всех нелинейных членов. Такое решение позволяет получить относительно простыми средствами результирующий сигнал, характерный для гетеродинных ВАЦ. Данный метод универсален относительно используемых видов модуляции. Главное, чтобы модуляция была отдельной, а частоты модулирующих напряжений были разными. Поскольку обработка измерительной информации происходит на разностной частоте, метод эффективен как при использовании ФМГ, так и АМ. Достоинством метода является и его реализуемость практически во всем диапазоне миллиметровых волн, включая его коротковолновую часть.

Структурная схема гомодинного анализатора цепей с отдельной модуляцией измерительного и опорного сигналов показана на рис. 5.5.

Рассмотрим случай отдельной амплитудной модуляции, требующий применения автономных амплитудных модуляторов для опорного (М1) и измерительного (М2) каналов. Принципиальным является различие частот модуляции, а вид модулирующего сигнала может быть любой. Будем считать его синусоидальным. Выделение полезного сигнала и обработка измерительной информации производится на разностной или суммарной частотах модуляции.

Следует отметить, что аналогичный измерительный сигнал может быть получен и в результате двойной модуляции измерительного сигнала [320],

однако практическая реализация раздельной модуляции оказывается значительно проще, чем двойной. Поэтому она является более предпочтительной, универсальной к виду модуляции и диапазону частот ВАЦ.

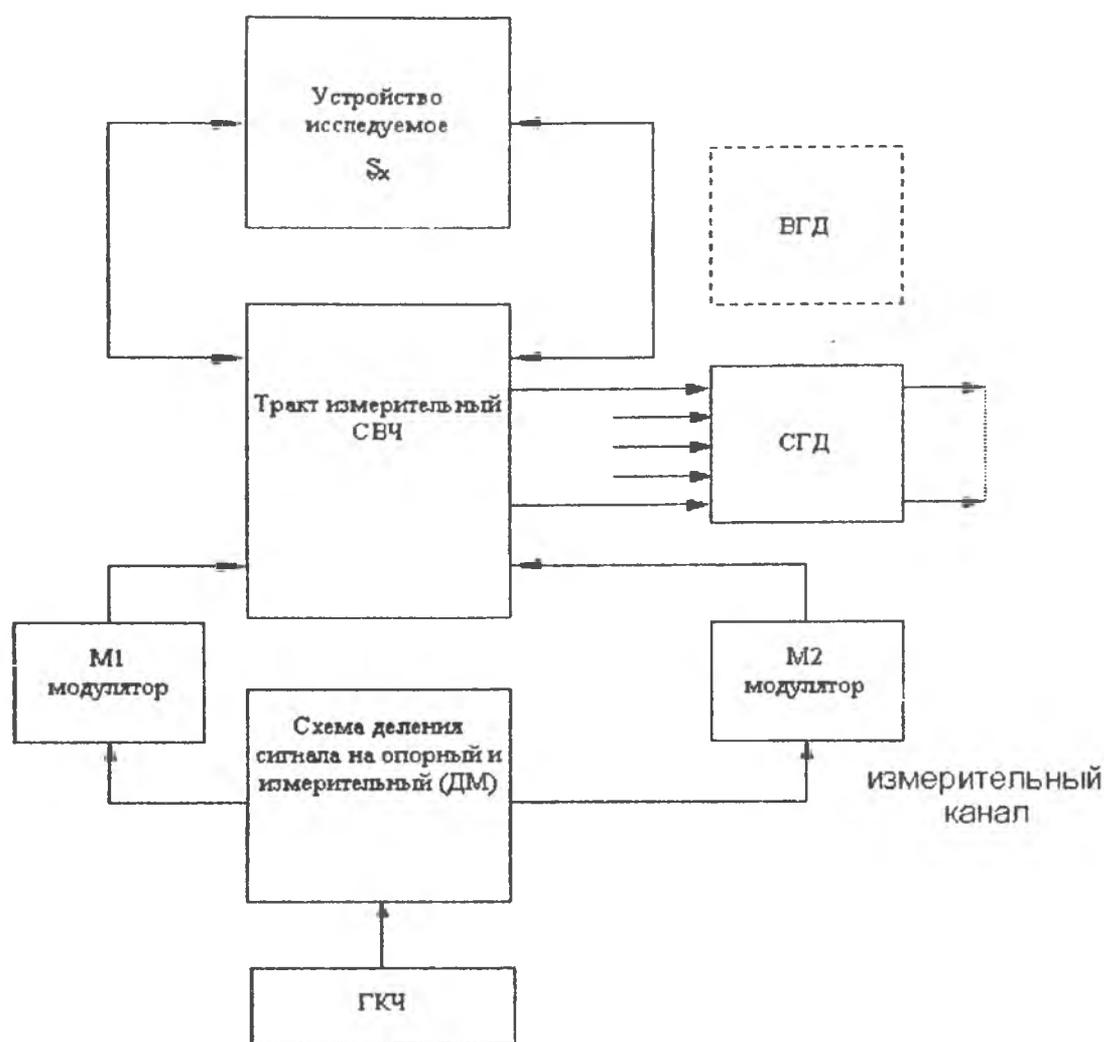


Рис. 5.5. Структурная схема измерительного СВЧ тракта с раздельной модуляцией опорного и измерительного сигналов

Покажем, что даже при обычной АМ опорного сигнала с частотой Ω_1 , а измерительного сигнала с частотой Ω_2 выходные напряжения амплитудно-фазовых детекторов (АФД) описываются выражениями (5.29) и (5.30) при аппроксимации характеристик диодов СГД полиномом второй степени. В спектральном составе выходных напряжений при этих исходных условиях имеем:

Напряжение постоянного тока:

$$U_1^I = \alpha_1 E_0^2 \left[K_1^2 + 2K_1 K_2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) + K_2^2 |S_x|^2 \right]; \quad (5.39)$$

Напряжение частоты Ω_1 :

$$U_1^{II} = \alpha_1 M_1 E_0^2 \left[K_1^2 + 2K_1 K_2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) \right] \cos \Omega_1 t, \quad (5.40)$$

где M_1 – значение коэффициента АМ в опорном канале;

Напряжение частоты Ω_2 :

$$U_1^{III} = \alpha_1 M_2 E_0^2 \left[2K_1 K_2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) + K_2^2 |S_x|^2 \right] \cos \Omega_2 t, \quad (5.41)$$

где M_2 – значение коэффициента АМ в измерительном канале;

Напряжение частоты $2\Omega_1$:

$$U_1^{IV} = \frac{1}{2} \alpha_1 M_1^2 K_1^2 E_0^2 \cos 2\Omega_1 t; \quad (5.42)$$

Напряжение частоты $2\Omega_2$:

$$U_1^V = \frac{1}{2} \alpha_1 M_2^2 K_2^2 E_0^2 |S_x|^2 \cos 2\Omega_2 t; \quad (5.43)$$

Напряжения частот $(\Omega_1 + \Omega_2)$ и $(\Omega_1 - \Omega_2)$:

$$U_1^{VI} = \alpha_1 M_1 M_2 K_1 K_2 E_0^2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) \left[\cos(\Omega_1 + \Omega_2)t + \cos(\Omega_1 - \Omega_2)t \right]. \quad (5.44)$$

Из полученных выражений следует, что если в качестве сигнала измерительной информации выбрать напряжение частоты $(\Omega_1 + \Omega_2)$, определяемое первым членом в (5.44), или напряжение частоты $(\Omega_1 - \Omega_2)$, определяемое вторым членом выражения (5.44), то каждое из них свободно от нелинейных членов. Более того, каждое из этих напряжений является фактически не продуктом прямого детектирования амплитудно-модулированного СВЧ сигнала, а продуктом преобразования частоты СВЧ сигналов, представляемых боковыми полосами в спектрах опорного $(\omega_0 \mp \Omega_1)$ и измерительного $(\omega_0 \pm \Omega_2)$ сигналов.

Анализ полученных выражений показывает, прежде всего, что данный метод является своеобразным обобщением рассмотренных выше методов. Здесь присутствует и напряжение постоянного тока (5.39), характерное для метода двенадцатиполосника, и напряжение частоты Ω_1 используемое в схемах с модуляцией опорного сигнала, и, наконец, напряжение частоты Ω_2 , используемое в методе Шафера-Кона. Вместе с тем на выходе АФД присутствуют составляющие напряжения частот $(\Omega_1 \pm \Omega_2)$, причём каждое из них согласно (5.32) полностью свободно от нелинейных членов.

Следует отметить, что на динамический диапазон такого анализатора существенное влияние оказывают значения коэффициентов модуляции опорного и измерительного каналов M_1 и M_2 , как следствие неоптимальных энергетических соотношений, имеющих место при амплитудной модуляции. Переход от амплитудной модуляции к фазовой манипуляции по алгоритму $0/\pi$ устраняет этот недостаток и расширяет динамический диапазон ВАЦ.

Имеет место сходство характеристик гибридных гомодинных и гетеродинных анализаторов цепей. Чтобы подтвердить аналогию между ними, представим напряжения (5.40) и (5.41) не как продукт прямого детектирования АМ сигналов, а как продукт преобразования частоты сигналов, являющихся боковыми полосами в спектрах опорного и измерительного сигналов. Предполагая модулирующие напряжения частот Ω_1 и Ω_2 синусоидальными, проиллюстрируем процесс преобразования частоты графически (рис. 5.6).

Видно, что на выходе каждого СГД имеется фактически по два сигнала частот $(\Omega_1 - \Omega_2)$ и $(\Omega_1 + \Omega_2)$. Они интерферируют между собой и на выходах соответствующих селективных усилителей могут быть выделены результирующие напряжения частот $(\Omega_1 - \Omega_2)$ и $(\Omega_1 + \Omega_2)$, амплитуды которых определяются соотношениями (5.40) и (5.41), а начальные фазы не зависят от φ_x . Эффект интерференции и соответствующий перенос информации о значении φ_x из начальных фаз парциальных напряжений в амплитуду результирующего напряжения как раз и отличают СГД от ВГД. Математически это находит своё отражение в форме выражений для напряжений (5.29) и (5.33). На практике это сказывается лишь на алгоритме обработки измерительной информации. Если говорить о сути работы СГД, то в гибридных анализаторах цепей имеет место не прямое детектирование опорного и измерительного сигналов, а преобразование их частоты.

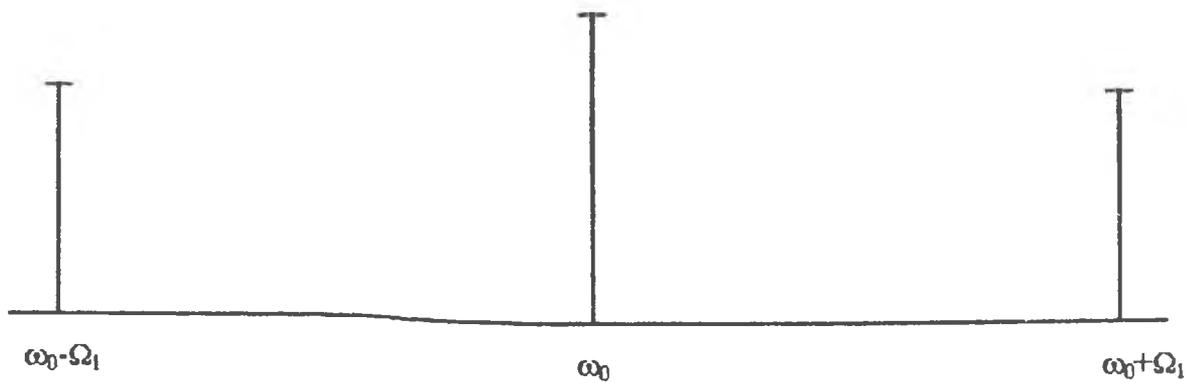
Таким образом, метод, реализующий отдельную модуляцию опорного и измерительного сигналов, оказывается универсальным по отношению к самому виду модуляции и успешно реализуется даже при простейших способах модуляции.

Для данного метода можно записать:

$$U_1 = \alpha_1 M_1 M_2 K_1' K_2' E_0^2 |S_x| \cos(\varphi_x + \varphi_H) \cos(\Omega_1 - \Omega_2) t; \quad (5.38)$$

$$U_2 = \alpha_2 M_1 M_2 K_1'' K_2'' E_0^2 |S_x| \sin(\varphi_x + \varphi_H + \delta) \cos(\Omega_1 - \Omega_2) t. \quad (5.39)$$

а) опорный сигнал



б) измерительный сигнал

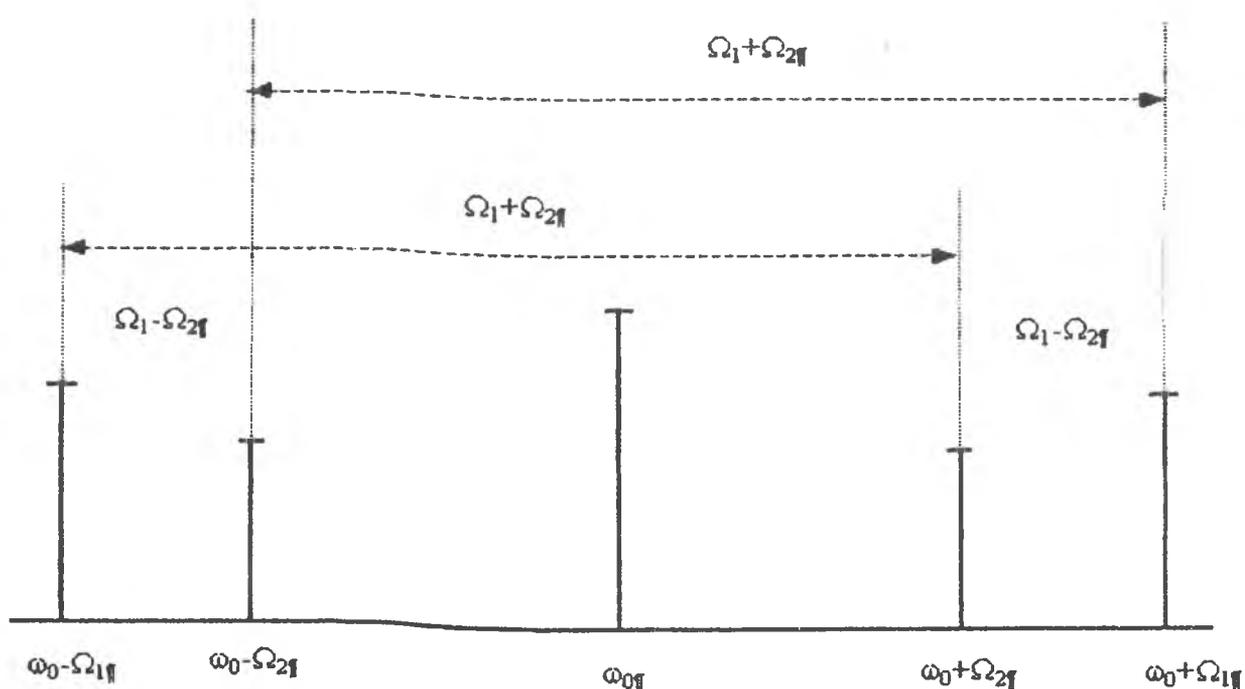


Рис. 5.6. Спектр сигнала при модуляции опорного и измерительного сигнала

Отметим ещё одно принципиальное обстоятельство. Как видно из (5.42), напряжение с частотой $2\Omega_1$ пропорционально E_0^2 , т.е. выходной мощности ГКЧ, и не зависит от $|S_x|$ и φ_x . Следовательно, оно может быть использовано для функционирования системы АРМ ГКЧ и необходимость в специальном датчике системы АРМ отсутствует. Действительно, для функционирования системы АРМ достаточно выделить с помощью селективного усилителя, настроенного на частоту $2\Omega_1$, напряжение (5.42). Следует отметить, что в случае использования АФД мы имеем не одно, а два напряжения вида (5.42):

$$U_1 = \frac{1}{2} \alpha_1 M_1^2 K_1'^2 E_0^2 \cos 2\Omega_1 t; \quad (5.40)$$

$$U_2 = \frac{1}{2} \alpha_2 M_1^2 K_1'^2 E_0^2 \cos 2\Omega_1 t. \quad (5.41)$$

На практике для АРМ методически правильнее использовать напряжение:

$$U_{АРМ} = \frac{1}{2}(U_1^{IV} + U_2^{IV}), \quad (5.42)$$

Усредняющее разброс характеристик α_1 и α_2 , K_1' и K_1'' .

Можно пойти и по другому пути - использовать $U_{АРМ}$ не для стабилизации выходной мощности ГКЧ, а для нормирования по нему информационных сигналов (3.38) и (3.39). Такое нормирование, выполняемое как операция деления, может быть реализовано аналоговыми (с помощью отношения напряжений) или цифровыми (при обработке информации в ЭВМ) способами. При этом исключается влияние системы АРМ на характеристики ГКЧ и прежде всего на стабильность частоты генератора.

Достоинства метода с отдельной модуляцией измерительного и опорного сигналов, рассмотренные выше, определяют целесообразность его использования и популярность при создании волноводных векторных анализаторов цепей в миллиметровом диапазоне волн. Большинство разработанных гомодинных ВАЦ для сечений волноводных трактов 11x5,5мм, 7,2x3,4мм, 5,2x2,6мм, 3,6x1,8мм, 2,4x1,2мм и 1,6x0,8мм были построены именно по такой схеме с использованием различных видов модуляции - и АМ, и линейной ФМ, и ФМП. Подробные схемы и принцип действия различных типов таких гомодинных ВАЦ рассмотрены далее в главах.

5.5. Гомодинные анализаторы для исследования цепей СВЧ

Анализ показал, что расширение динамического диапазона измеряемых ослаблений становится возможным только в том случае, если формирование сигналов измерительной информации будет основано не на квадратичном детектировании интерференционного СВЧ-сигнала (что имеет место в известных структурах гомодинных АЦ), а на линейном преобразовании частоты измерительного и опорного сигналов, характерном для гетеродинных АЦ. Суть метода заключается в отдельной модуляции опорного и измерительного сигналов с частотой F . В этом случае сигнал измерительной информации можно рассматривать как результат преобразования частоты сигналов, являющихся боковыми полосами в спектрах опорного и измерительного сигналов.

Таким образом, в методе, описанном в работе [321] происходит, с одной стороны, трансформация фазовых измерений в амплитудные, что характерно для гомодинных АЦ. С другой стороны интерференция имеет место не на СВЧ (с последующим квадратичным детектированием), а на промежуточной частоте после линейного преобразования частоты. Этим и объясняется потенциальное расширение динамического диапазона измеряемых ослаблений. Наиболее

эффективным это расширение будет при балансной амплитудной или дискретной фазовой модуляции (по алгоритму 0/180 град.) измерительного и опорного СВЧ-сигналов. Так как в АЦ, реализующих метод, сочетаются свойства гетеродинных и гомодинных АЦ, они были названы гибридными АЦ.

Структура измерительных СВЧ-трактов гомодинных АЦ должна обеспечивать получение двух сигналов, один из которых пропорционален вещественной, а второй ~ мнимой части измеряемого S-параметра. Кроме того, при автоматизации измерений всех S-параметров СВЧ-тракт должен обеспечивать распространение измерительных сигналов во взаимно противоположных направлениях, т.е. иметь кольцевую структуру. Все это значительно усложняет измерительные СВЧ-тракты известных гомодинных АЦ по сравнению с гетеродинными.

В СВЧ-трактах гомодинных АЦ могут быть осуществлены различные варианты одновременно или поочередного (с достаточной скоростью) формирования двух необходимых сигналов измерительной информации. Эти варианты реализуют так называемый аппаратный принцип формирования сигналов измерительной информации. Поскольку все они осуществляются с помощью СВЧ-трактов примерно одинаковой сложности, основной акцент при внедрении метода был сделан на исследовании иного принципа формирования - аппаратно-программного. Другими словами, с помощью СВЧ-тракта формируется только один сигнал измерительной информации, пропорциональный, например, вещественной части измеряемого S-параметра. Второй сигнал, пропорциональный уже мнимой части, формируется программным путем из первого сигнала.

Для реализации такого принципа было применено общеизвестное преобразование Гильберта.

Оно, в свою очередь, может быть реализовано как аппаратно-программным путем, так и чисто программным путем. Второй путь не усложняет устройство обработки измерительной информации АЦ, а реализуется в персональной ЭВМ с помощью специальной подпрограммы. В основу этой подпрограммы положен алгоритм прямого решения интеграла Гильберта при дискретизации исходного сигнала с учетом требований теоремы Котельникова.

Ясно, что программное формирование мнимой части измеряемого S-параметра значительно упрощает структуру измерительного СВЧ-тракта. Если не учитывать наличие модуляторов в опорном и измерительном каналах, он в принципе становится не сложнее СВЧ-тракта гетеродинного АЦ.

Уже отмечалось, что обеспечение автоматизации измерения всех S-параметров ЧП требует кольцевой структуры измерительного тракта, позволяющей наиболее просто организовать распространение СВЧ-сигналов через ЧП во взаимно противоположных направлениях. Если объектами измерений являются двухполюсники (ДП), кольцевая структура ИТ

обеспечивает одновременное измерение коэффициентов отражения двух ДП. Структурная схема такого ИТ приведена на рис. 5.7.

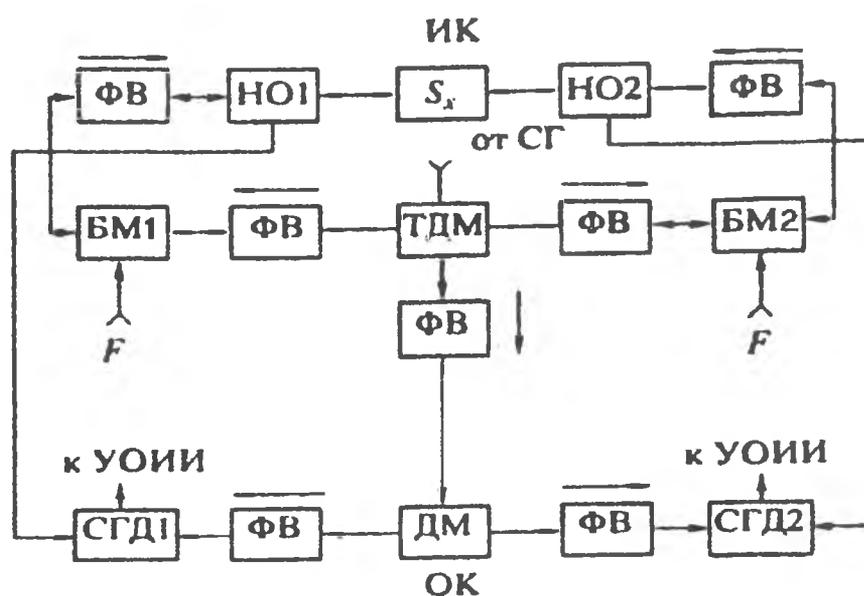


Рис. 5.7. Структурная схема векторного анализатора цепей

Сигнал СГ разветвляется с помощью трехканального делителя мощности (ТДМ) и поступает в опорный канал (ОК) и плечи кольцевого тракта, образующего измерительный канал (ИК). В каждое плечо ИК и в ОК включены балансные модуляторы (БМ). БМ2 и БМ3 - модулирующие напряжения, имеющие частоту F . Все они формируются в ГМН.

Из рис. 5.7 видно также, что в качестве функциональных узлов, обеспечивающих извлечение СВЧ-сигналов, несущих информацию об измеряемых S -параметрах, использованы типовые направленные ответвители НО1 и НО2. При этом НО1 ориентирован на сигналы, пропорциональные S_{11} и S_{12} , а НО2- на сигналы, пропорциональные S_{22} и S_{21} .

Для построения устройства обработки измерительной информации (УОИИ) по одноканальной схеме сбор измерительной информации осуществляется не за один, а за четыре периода свипирования частоты (по одному периоду на каждый параметр). В кольцевом тракте обеспечивается не одновременное распространение СВЧ-сигналов через исследуемый ЧП в противоположных направлениях, а поочередное. Этого удастся достигнуть, организовав подачу модулирующего напряжения с частотой F_2 не одновременно на БМ2 и БМ3, а поочередно в разные периоды свипирования частоты.

Отсутствие модулирующего напряжения превращает модуляторы в аттенюаторы с большим ослаблением. Это очень важно для развязки плеч кольцевого тракта в соответствующие периоды свипирования частоты. Но одного этого с учетом реальных параметров ТДМ недостаточно. Поэтому в плечи кольцевого тракта включены по два ферритовых вентиля (ФВ) и три ФВ дополнительно установлены в ОК. Они, кроме того, уменьшают погрешности из-за рассогласования БМ и скалярных гомодинных детекторов (СГД), в качестве которых используются балансные смесители.

В целом УОИИ осуществляет аналого-цифровую обработку выходных сигналов СГД1 и СГД2 частоты F по одноканальной схеме. Выходные сигналы СГД1 и СГД2 после предварительного усиления поступают на электронный коммутатор, управляемый от интерфейса. Далее следует одноканальный логарифмический усилитель с синхронным детектором (СД). Выходное напряжение СД преобразуется с помощью 12-разрядного АЦП в цифровой код. За каждый период свипирования частоты формируются цифровые коды, соответствующие значениям вещественной части измеряемого S -параметра в 256 частотных точках. Эти коды трансформируются далее в стандарт IEEE-488.

В режиме измерения S_{11} и S_{22} входное напряжение АЦП может быть представлено в виде

$$U_{x11(22)c} = \mu_{11(22)} \left| \bar{A}_{x11(22)} \right| \cos(\varphi_{x11(22)} + \varphi_{n11(22)}) \quad (5.43)$$

где $\left| \bar{A}_{x11(22)} \right|$ и $\varphi_{x11(22)}$ модуль и аргумент комплексного коэффициента $\bar{A}_{x11(22)}$, в котором заключена информация об измеряемом параметре $S_{11(22)}$; $\mu_{11(22)}$ – коэффициент пропорциональности, учитывающий амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ОК и ИК в данном режиме; $\varphi_{n11(22)}$ – фазовый сдвиг, учитывающий неидентичность фазо-частотных характеристик (ФЧХ) этих каналов.

Соответственно при измерении S_{11} и S_{12} имеем:

$$U_{x21(12)c} = \mu_{21(12)} \left| \bar{A}_{x21(12)} \right| \cos(\varphi_{x21(12)} + \varphi_{n21(12)}) \quad (5.44)$$

С помощью преобразования Гильберта программным путем формируются числовые массивы, соответствующие

$$U_{x11(22)s} = \mu_{11(22)} \left| \bar{A}_{x11(22)} \right| \cos(\varphi_{x11(22)} + \varphi_{n11(22)}) \quad (5.45)$$

$$U_{x21(12)s} = \mu_{21(12)} \left| \bar{A}_{x21(12)} \right| \cos(\varphi_{x21(12)} + \varphi_{n21(12)}) \quad (5.46)$$

Количественная связь между результатами измерений и искомыми параметрами зависит от математических моделей, описывающих ИТ АЦ. Если объектами измерения являются ДП, подключаемые ко входу 1 и 2 АЦ, то их коэффициенты отражения и измеренные значения связаны известным соотношением

$$\bar{A}_{x21(12)} = \bar{d}_{1(2)} + \frac{\bar{\Gamma}_{x1(2)}}{1 - \bar{\rho}_{1(2)}\bar{\Gamma}_{x1(2)}} \quad (5.47)$$

где $\bar{d}_{1(2)}$ - эффективные направленности НО1 или НО2, $\bar{\rho}_{1(2)}$ - коэффициенты отражения входов 1 и 2 со стороны СГ.

Эта формула используется для расчета параметров ДП при условии предварительной калибровки АЦ по соответствующему алгоритму. В случае ЧП расчетные формулы для всех S-параметров имеют следующий вид:

$$\bar{S}_{11(22)} \equiv \bar{\Gamma}_{x1(2)} - \bar{V}_{x1}\bar{V}_{x2}\bar{\rho}_{2(1)} \quad (5.48)$$

$$\bar{S}_{21(12)} \equiv \bar{V}_{x1(2)}(1 - \bar{\rho}_1\bar{\Gamma}_{x1} - \bar{\rho}_2\bar{\Gamma}_{x2}) \quad (5.49)$$

Результаты измерений S-параметров могут представляться либо в полярной, либо в декартовой системе координат. Полярные координаты употребляются для воспроизведения частотных характеристик величин. При этом вычисления базируются на использовании массивов вещественных и мнимых частей комплексных чисел. Рассчитанные значения S-параметров автоматически соответствуют полярной системе координат и представляются в виде диаграммы Смита. Для перехода к декартовым координатам используются общеизвестные формулы.

Помимо измерения S-параметров, АЦ позволяют определять частотные характеристики группового времени запаздывания (ГВЗ), что важно при оценке нелинейности ФЧХ ЧП.

5.5.1. Технические и эксплуатационные возможности АЦ

Разработанные АЦ перекрывают в целом частотный диапазон от 1,5 до 118 ГГц. Измерение S-параметров и ГВЗ производится при свипировании частоты с периодом 1 с. При этом максимальная полоса свипирования равна диапазону частот данного типа АЦ, а минимальная составляет 20% от максимальной. Основная погрешность измерения частоты с помощью курсора находится в пределах $\pm 1\%$.

Динамический диапазон разработанных АЦ, достигает 80 дБ, что позволяет измерять S-параметры в пределах от 10 до -70 дБ. Основная погрешность при измерении S_{11} и S_{22} не более

$$\pm (0,4 + 0,03|\bar{S}_{11(22)}|), \text{ дБ} \quad (5.50)$$

а при измерении S_{12} и S_{21}

$$\pm (0,4 + 0,02|\bar{S}_{21(12)}|), \text{ дБ} \quad (5.51)$$

Что касается фазовых измерений, то основная погрешность измерения $\arg S_{11}$ и $\arg S_{22}$ находится в пределах

$$\pm (3,5 + 0,1|\bar{S}_{11(22)}|), \text{ град} \quad (5.52)$$

а при измерении $\arg S_{21}$ и $\arg S_{12}$

$$\pm (2,5 + 0,1|\bar{S}_{21(12)}|), \text{ град} \quad (5.53)$$

АЦ обеспечивают измерение параметров различных разновидностей ЧП: пассивных и активных, линейных и нелинейных, без преобразования и с преобразованием частоты. Типичными нелинейными ЧП без преобразования частоты являются усилители СВЧ (активные нелинейные ЧП) и умножители частоты (пассивные нелинейные ЧП). Учитывая, что одномодовые волноводные каналы - это типичные полосовые фильтры, имеет практический смысл только измерение S_{21} и S_{12} усилителей СВЧ по первой гармонике. В этом случае нелинейность объекта измерения учитывается только правильным выбором уровня зондирующего сигнала. Других особенностей режим измерения нелинейных ЧП без преобразования частоты не имеет и по алгоритму обработки измерительной информации не отличается от измерения S-параметров линейных ЧП.

Аналогична в принципе ситуация с измерением параметров нелинейных ЧП с преобразованием частоты (например, смесителей). Однако здесь трудности возникают при измерении комплексных коэффициентов преобразования из-за необходимости перехода к измерению сигналов на промежуточной частоте. В АЦ реализован оригинальный способ прямого измерения коэффициентов передачи, без перехода на промежуточную частоту.

5.5.2. Режим калибровки

В этом режиме с помощью специальных образцовых мер (ОМ) S-параметров выполняются калибровочные операции. Обработка полученных результатов позволяет определить так называемые собственные параметры АЦ. Учет их в процессе анализа цепей и в алгоритме обработки измерительной информации позволяет исключить из результатов измерений целый ряд систематических погрешностей.

В качестве ОМ используются согласованные нагрузки (СН), короткозамыкатели (КЗ) и меры фазового сдвига (МФ), представляющие собой

калиброванные по длине отрезки волновода. При этом длины одной меры МФ1 отличаются от длины другой меры МФ2 на величину Δl . В качестве начальных условий предлагается

$$|\bar{\Gamma}_{СН}| = 0; |\bar{\Gamma}_{КЗ}| = 1 \text{ и } \varphi_{КЗ} = 180 \text{ град} \quad (5.54)$$

Если соединять МФ с СН или КЗ, то замена МФ1 на МФ2 изменяет фазу коэффициента отражения СН или КЗ на величину 2φ , определяемую выбранным значением Δl и имеющую частотную зависимость

$$2\varphi = \frac{720\Delta l}{c} \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2af}\right)^2}, \text{ град} \quad (5.55)$$

где c - скорость света; a - размер широкой стенки волновода МФ1 и МФ2.

Расчеты значений 2φ автоматизированы и производятся во всех частотных точках диапазона АЦ. Результаты показали, что изменение 2φ не превышает (180 ± 60) град.

В волноводных АЦ с кольцевым измерительным СВЧ-трактом возникают свои особенности и даже сложности при подключении ЧП. На рис. 5.8 показано, что в режиме калибровки ЧП заменяется двумя технологическими отрезками волновода (ТОВ1 и ТОВ2), которые в сумме образуют базовую длину.

Если объектами измерений являются ДП, то напрашивается вариант непосредственного подключения их ко входам 1 и 2 АЦ. Однако это нарушило бы симметрию измерительного канала - длины его при измерениях параметров ЧП и ДП. Они стали бы настолько отличаться, что при постоянной длине опорного канала оказалось бы практически невозможным учесть эту разницу программным путем. Поэтому ТОВ 1 и ТОВ2 используются и при подключении ДП.

В АЦ предусмотрено несколько алгоритмов калибровки. Наиболее полный алгоритм применяется при измерении параметров ЧП. Он включает пять калибровочных операций, перечисленных в таблице.

Обработка полученных результатов калибровочных измерений позволяет вычислить следующие собственные параметры АЦ:

$$\bar{d}_{1пр} = \frac{\bar{U}_{К11(4)} - \exp(j2\varphi)\bar{U}_{К11(1)}}{1 - \exp(j2\varphi)} \quad (5.56)$$

$$\bar{d}_{2\text{пр}} = \frac{\bar{U}_{K22(2)} - \exp(j2\varphi)\bar{U}_{K22(3)}}{1 - \exp(j2\varphi)} \quad (5.57)$$

$$\bar{\rho}_1 = \frac{\bar{d}_{1\text{пр}} - \bar{U}_{K11(3)} - \exp(j2\varphi)[\bar{d}_{1\text{пр}} - \bar{U}_{K11(2)}]}{\exp(j2\varphi)(\bar{U}_{K11(3)} - \bar{U}_{K11(2)})} \quad (5.58)$$

$$\bar{\rho}_2 = \frac{\bar{d}_{2\text{пр}} - \bar{U}_{K22(3)} - \exp(j2\varphi)[\bar{d}_{2\text{пр}} - \bar{U}_{K22(4)}]}{\exp(j2\varphi)(\bar{U}_{K22(1)} - \bar{U}_{K22(4)})} \quad (5.59)$$

| Подключение Ом ко входам 1 и 2 БВА | Математическая модель | Результат калибровки |
|---|---|------------------------------------|
| Вход 1 – МФ1 + ТОВ1 + СН1 | $\vec{A}_{K11(1)} = \vec{d}_1 + \frac{\vec{\Gamma}_{CH1}}{1 - \vec{\rho}_1 \vec{\Gamma}_{CH1}}$ | $\vec{U}_{K11(1)}$ |
| Вход 2 – МФ2 + ТОВ2 + КЗ2 | $\vec{A}_{K22(1)} = \vec{d}_2 + \frac{\vec{\Gamma}_{K32} \exp(j2\varphi)}{1 - \vec{\rho}_2 \vec{\Gamma}_{K32} \exp(j2\varphi)}$ | $\vec{U}_{K22(1)}$ |
| Вход 1 – МФ1 + ТОВ1 + КЗ1 | $\vec{A}_{K11(2)} = \vec{d}_1 + \frac{\vec{\Gamma}_{K31}}{1 - \vec{\rho}_1 \vec{\Gamma}_{K31}}$ | $\vec{U}_{K11(2)}$ |
| Вход 2 – МФ2 + ТОВ2 + СН2 | $\vec{A}_{K22(2)} = \vec{d}_2 + \frac{\vec{\Gamma}_{CH2} \exp(j2\varphi)}{1 - \vec{\rho}_2 \vec{\Gamma}_{CH2} \exp(j2\varphi)}$ | $\vec{U}_{K22(2)}$ |
| Вход 1 – МФ2 + ТОВ1 + КЗ1 | $\vec{A}_{K11(3)} = \vec{d}_1 + \frac{\vec{\Gamma}_{K31} \exp(j2\varphi)}{1 - \vec{\rho}_1 \vec{\Gamma}_{K31} \exp(j2\varphi)}$ | $\vec{U}_{K11(3)}$ |
| Вход 2 – МФ1 + ТОВ2 + СН2 | $\vec{A}_{K22(3)} = \vec{d}_2 + \frac{\vec{\Gamma}_{CH2}}{1 - \vec{\rho}_2 \vec{\Gamma}_{CH2}}$ | $\vec{U}_{K22(3)}$ |
| Вход 1 – МФ2 + ТОВ1 + СН1 | $\vec{A}_{K11(4)} = \vec{d}_1 + \frac{\vec{\Gamma}_{CH1} \exp(j2\varphi)}{1 - \vec{\rho}_1 \vec{\Gamma}_{CH1} \exp(j2\varphi)}$ | $\vec{U}_{K11(4)}$ |
| Вход 2 – МФ1 + ТОВ2 + КЗ2 | $\vec{A}_{K22(4)} = \vec{d}_2 + \frac{\vec{\Gamma}_{K32}}{1 - \vec{\rho}_2 \vec{\Gamma}_{K32}}$ | $\vec{U}_{K22(4)}$ |
| Вход 1 – МФ1 + + ТОВ1 + ТОВ2 + + МФ1 – Вход 2 | $\vec{B}_{K21} = 1; \vec{B}_{K12} = 1$ | \vec{U}_{K31} \vec{U}_{K12} |

При измерении параметров ДП достаточно провести четыре первых калибровочных операции, так как последняя операция касается только измерения S_{21} и S_{12} . Кроме того, количество калибровочных операций может быть снижено до трех при измерении параметров ЧП и до двух при измерении параметров ДП. Это достигается за счет упрощения математической модели ИТ

при пренебрежении значениями d . Такое упрощение правомерно в случае использования Н01 и Н02 с высокими характеристиками.

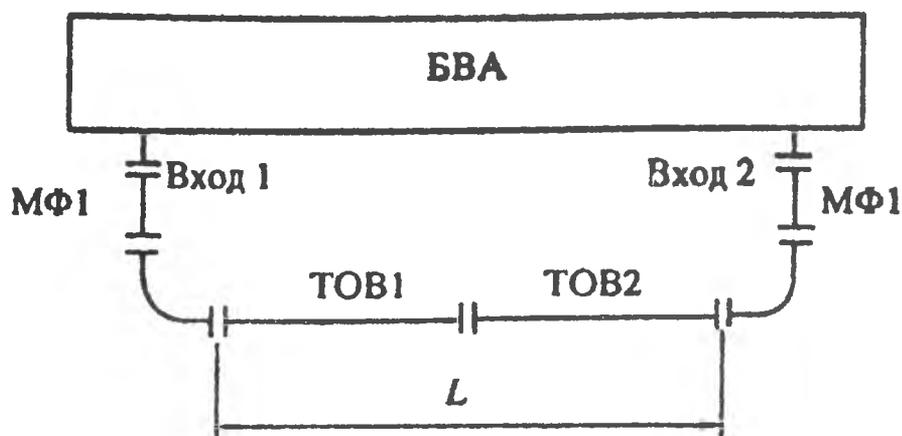


Рис. 5.8. Схема подключения АЦ в режиме калибровки

Для всех разновидностей ДП и ЧП предусмотрены режим количественного измерения параметров и режим настройки. В свою очередь, режим количественного измерения может иметь различную точность в зависимости от скорости обработки измерительной информации.

5.5.3. Режим количественного измерения параметров

Этот режим работы в принципе является типовым. Частотные характеристики S_{11} и S_{22} воспроизводятся как в полярных (диаграмма Смита), так и в декартовых координатах. Частотные характеристики S_{21} и S_{12} воспроизводятся только в декартовых координатах. При этом вместо ФЧХ может быть представлена частотная характеристика ГВЗ. Значения S-параметров и ГВЗ могут быть отсчитаны на любой частоте (в пределах диапазона свипирования) с помощью курсора.

Особенностью режима является возможность повышения точности измерений за счет многократного съема и усреднения получаемой измерительной информации. В АЦ предусматривается 2-, 4-, 8-, 16- или 32-кратный съем информации о значении вещественной части каждого S-параметра с последующим усреднением.

Процесс измерения начинается с подключения ко входам БВА объекта измерения. Если им является ЧП, он подключается вместо геометрического аналога по схеме рис. 5.8. Если это двухполюсники, то они подключаются ко входам 1 и 2 АЦ. Само подключение объектов измерений совмещают с этапом обработки результатов калибровочных измерений.

Рассмотрим общий случай - измерение параметров ЧП. Тогда результаты измерения напряжений, соответствующие всему циклу сбора измерительной информации, вычисляются в ЭВМ. Обработка измерительной

информации начинается с вычисления вспомогательных массивов, соответствующих мнимым частям S-параметров:

С учетом результатов калибровки, измерений и уравнений можно найти значения:

$$\bar{\Gamma}_{x1} = \frac{1}{\bar{\rho}_1 - (1 + \bar{\rho}_1) \frac{\bar{U}_{K11(2)} - \bar{d}_{1пр}}{\bar{U}_{x11} - \bar{d}_{1пр}}} \quad (5.60)$$

$$\bar{\Gamma}_{x2} = \frac{1}{\bar{\rho}_2 - (1 + \bar{\rho}_2) \frac{\bar{U}_{K22(4)} - \bar{d}_{2пр}}{\bar{U}_{x22} - \bar{d}_{2пр}}} \quad (5.61)$$

Расчетами по вышеприведенным формулам заканчивается обработка измерительной информации, если объектами измерений являются два ДП, а результаты измерений воспроизводятся на диаграмме Смита. При необходимости производится преобразование системы координат. Если объектом измерения является ЧП, из результатов калибровки и измерения определяются коэффициенты, с помощью которых находят искомые значения S-параметров.

Заключительной операцией при обработке информации является определение значений ГВЗ.

5.5.4. Режим настройки

Этот режим предназначен для регулировки объекта измерения по одному из S-параметров (исключая, естественно, ДП, где этот параметр является единственным). Если же регулируемыми являются несколько S-параметров и имеются соответствующие органы регулировок, то регулировка будет выполняться последовательно по каждому из этих параметров. При этом оператор размещает воспроизводимые АЧХ и ФЧХ S-параметра в пределах зон, ограниченных максимальным и минимальным значениями модуля и аргумента измеряемого параметра. Основное требование в этом режиме - высокое быстродействие АЦ. Это достигается, во-первых, за счет того что сбор информации происходит только для одного из параметров (т.е. цикл сбора сокращается с четырех периодов свипирования частоты до одного). Во-вторых, существенно сокращается время на обработку измерительной информации за счет упрощения математической модели. В-третьих, значительно сокращено количество коэффициентов преобразования Гильберта.

5.5.5. Режим измерения S-параметров устройств с преобразованием частоты

В миллиметровом диапазоне устройства с преобразованием частоты (смесители), как правило, являются балансными и конструктивно имеют автономные каналы подачи на диоды сигналов радиочастоты (RF), а также канал сигнала промежуточной частоты (IF). В канале IF могут быть различные фильтры: нижних частот, верхних частот и полосовые. В зависимости от схемы фильтра можно выделить два практических случая, которые предусмотрены в режиме измерения комплексного коэффициента преобразования смесителей.

Первый случай учитывает наличие на выходе IF смесителя как постоянной составляющей преобразованного сигнала, так и составляющей IF. Этот случай достаточно распространен и имеет место при наличии в канале IF фильтра нижних частот, не разрывающего гальваническую связь между диодами и выходом IF. Если такой смеситель подключить входом RF ко входу 1 БВА, а входом LO ко входу 2 и нагрузить выход IF на согласованную нагрузку, то будет измерена развязка между входами IF и LO $|\bar{S}_{RL}|$ и φ_{RL} . Если теперь отключить согласованную нагрузку и подать на выход IF постоянное напряжение смещения положительной полярности, то это приведет к открытию одного из диодов. Смеситель превращается в модулятор и вместо $|\bar{S}_{RL}|$ и φ_{RL} измеряется $|L_c^+|$ и $(\varphi_{RL} + \varphi_c^+)$. Имея результат измерения φ_{RL} можно рассчитать искомое значение φ_c^+ . Заключительной измерительной операцией является подача на выход IF постоянного напряжения смещения отрицательной полярности и измерение $|L_c^-|$ и $(\varphi_{RL} + \varphi_c^-)$ с последующим расчетом φ_c^- . Совокупность характеристик $|L_c^+|$ и $|L_c^-|$ позволяет оценить не только потери преобразования $|\bar{L}_c|$, но и балансные свойства смесителя.

Второй случай учитывает наличие в канале IF полосового фильтра или фильтра верхних частот, разрывающих гальваническую связь между диодами и выходом IF. В этом случае прямое измерение L_c (без перехода к измерениям на IF) будет возможным, если в распоряжении пользователя имеются три смесителя и автономный источник гетеродинного сигнала LO. Разработан специальный алгоритм, который базируется известном способе, который сам по себе не может быть использован в разработанных АЦ, так как требует проведения измерений не только на частоте RF, но и на промежуточной частоте IF.

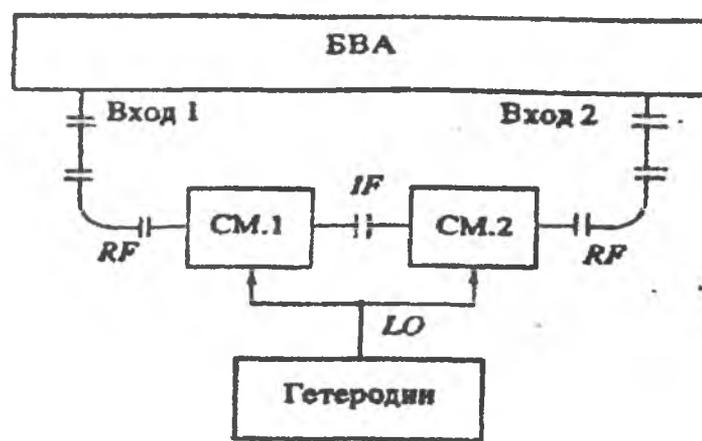


Рис. 5.9. Схема измерительной установки

Согласно предложенной методике измерения образуется последовательное соединение двух из трех смесителей (рис. 5.9), причем один смеситель оказывается прямовключенным (т.е. преобразует RF "вниз" до значения IF), а второй - обратновключенным (т.е. преобразует "вверх" до значения RF).

Таким образом, измеряется суммарный коэффициент преобразования двух смесителей $|\bar{L}_c^1| = |\bar{L}_{c1}| + |\bar{L}_{c2}|$ (дБ) и $\varphi_c^1 = \varphi_{c1} + \varphi_{c2}$. При второй измерительной операции второй смеситель заменяется на третий и измеряется $|\bar{L}_c^2| = |\bar{L}_{c1}| + |\bar{L}_{c3}|$ (дБ) и $\varphi_c^2 = \varphi_{c1} + \varphi_{c3}$. Для проведения заключительной операции необходимо заменить первый смеситель на второй и измерить $|\bar{L}_c^3| = |\bar{L}_{c2}| + |\bar{L}_{c3}|$ (дБ) и $\varphi_c^3 = \varphi_{c2} + \varphi_{c3}$. Из полученных значений можно найти $|\bar{L}_{c1}|, |\bar{L}_{c2}|, |\bar{L}_{c3}|, \varphi_{c1}, \varphi_{c2}, \varphi_{c3}$.

5.5.6. Режим воспроизведения характеристик S-параметров электрически управляемых устройств

Необходимо отметить реализацию в АЦ режима, удобного для исследования управляемых ЧП. Этот режим позволяет наблюдать картину изменения параметров ЧП под воздействием управляющих сигналов на предварительно выбранной частоте. Примером таких ЧП могут быть, например, электрически управляемые фазовращатели, используемые в фазовых антенных решетках, управляемые аттенуаторы и т.п. Алгоритмы измерений аналогичны рассмотренным режимам количественных измерений и настройки. Особенность заключается лишь в форме представления информации. Воспроизводимая характеристика разбита на зоны, причем каждой зоне соответствует порядковый номер управляющего воздействия. Всего можно запрограммировать до 20-ти управляющих воздействий.

5.6. Измерение скалярных частотных характеристик двух- и четырехполюсников

В диапазонах СВЧ и КВЧ параметры и характеристики отдельных устройств и в целом трактов удобно оценивать с помощью волновой матрицы рассеяния, элементы которой имеют явный физический смысл и поддаются измерениям традиционными методами.

Для линейного четырехполюсника (ЧП) матрица рассеяния имеет вид:

$$[\dot{S}] = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

где $\dot{S}_{11}, \dot{S}_{22}$ - комплексные коэффициенты отражения входа и выхода ЧП;

$\dot{S}_{21}, \dot{S}_{12}$ - комплексные коэффициенты передачи ЧП в прямом и обратном направлениях.

Для определения всех параметров ЧП необходимо провести два измерения коэффициентов отражения (КО) и два измерения коэффициентов передачи (КП). Линейный двухполюсник (ДП) полностью характеризуется КО входа Γ_x .

Таким образом, элементы матрицы рассеяния достаточно полно характеризуют свойства КВЧ, СВЧ устройства, а все остальные используемые на практике параметры: коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН), ослабление и другие - могут быть определены по известным S-параметрам.

Значения элементов матрицы рассеяния являются частотно зависимыми, поэтому при проведении измерений обычно определяют частотную зависимость модулей (амплитудно-частотную характеристику - АЧХ) и аргументов (фазо-частотную характеристику - ФЧХ) S-параметров, а также КСВН и ослабления.

Для экспериментального определения значения модулей перечисленных параметров используют скалярные анализаторы цепей (САЦ), а для определения комплексных значений - ВАЦ. В последнее время в связи с широким внедрением персональных ЭВМ и микропроцессоров, проводящих не только обработку результатов измерения, но и полное управление процессом измерения, сформировался новый класс анализаторов - автоматические анализаторы цепей (ААЦ).

В настоящее время разработано достаточно много разнообразных методов измерения, которые эффективно используются в СДВ при построении АЦ. Однако их использование в ММДВ (особенно в средней - и коротковолновой его части) и субмиллиметровом диапазоне ограничено рядом

принципиальных трудностей, обусловленных особенностями указанных диапазонов.

Эти особенности в значительной мере влияют на метрологические характеристики средств измерений S-параметров. При этом существенное значение приобретают составляющие погрешностей измерения, обусловленные допусками на геометрические размеры элементов КВЧ измерительного тракта и фланцевых соединений, неточностью установки и нестабильностью частоты испытательных сигналов и др.

Допуски на геометрические размеры имеют значения порядка десяти мкм при длине волны $\lambda=4$ мм и единицы мкм при $\lambda=1$ мм. В частности, можно показать, что для волновода сечением $2,4 \times 1,2$ мм при заданном значении погрешности измерения фазы, равном $\pm 10^\circ$, допуск на геометрическую длину вдоль оси волновода не должен превышать ± 20 мкм. Такие же значения погрешностей получаются и для аналогичной по размерам нестыковки фланцевых соединений. Поэтому для обеспечения повторяемости калибровки и измерений в ММДВ к компонентам тракта и фланцевым соединениям предъявляются жесткие требования.

С проблемой допусков тесно смыкается задача обеспечения неподвижности и жесткости измерительного тракта при подключении объектов измерения и калибровочных мер. Даже небольшая механическая деформация тракта (порядка десятков мкм) может привести к значительным погрешностям измерений.

Следует отметить, что в ММДВ возрастают потери в металлических волноводах, которые возрастают до 3 дБ/м при $\lambda=4$ мм и до 12 дБ/м при $\lambda=1$ мм. Практически эти потери оказываются еще больше. Это обстоятельство обусловило применение (особенно в субмиллиметровом диапазоне) других типов волноводных трактов: металло-диэлектрических, диэлектрических и желобковых волноводов, квазиоптических лучеводов. Ограниченное применение в длинноволновой части ММДВ находят микрополосковые и микрокоаксиальные тракты. Однако основные функциональные узлы на основе перечисленных выше типов трактов пока находятся на стадиях разработки и исследования, и поэтому основным видом тракта в ММДВ остается прямоугольный металлический волновод.

Следующей важнейшей проблемой, характерной для измерений в ММДВ, являются большие погрешности измерения, обусловленные погрешностью установки и нестабильностью частоты генератора. Показано, что при одинаковых физической длине отрезка волновода и относительной погрешности установки частоты генератора, погрешность измерения фазы в ММДВ будет на порядок выше, чем в СДВ. Для обеспечения приемлемых значений метрологических характеристик ААЦ ММДВ необходимо, чтобы относительная погрешность установки и отсчета частоты не превышала $\pm(0,1-0,2)\%$.

Однако даже при обеспечении этого требования невозможно решить проблему измерения ФЧХ в обычном представлении, так как набеги фазы в измерительном тракте будут достигать десятки периодов. В этом случае в ММДВ целесообразно перейти от измерения абсолютных значений S-параметров к измерению относительных их значений. Такое решение позволяет исключить проблему гибких КВЧ соединителей и снижает требования к точности установки и отсчета частоты генератора.

Жесткие требования к частотным параметрам генератора обусловлены также большой "изрезанностью" и крутизной АЧХ и ФЧХ отдельных элементов и всего КВЧ измерительного тракта в целом. По этой же причине ужесточаются требования к точности и разрешающей способности устройств обработки измерительной информации.

5.6.1. Источники погрешностей

Представление об источниках ошибок при измерении скалярных частотных характеристик двух- и четырехполюсников дает анализ простейшей схемы для измерения модуля коэффициента отражения двухполюсников [322]. Измерительным устройством является или направленный мост, или направленный ответвитель (НО). При измерениях по такой схеме невозможно выделить ошибки, обусловленные различными источниками, однако ясно, что ограниченная направленность измерительного устройства и рассогласование его измерительного выхода вносят погрешности, искажающие величину измеряемого коэффициента отражения. Поскольку подобные устройства калибруются подключением к измерительному выходу нагрузки с модулем коэффициента отражения равным единице, отражение от измерительного выхода интерферирует с калибровочным отражением и ухудшает точность измерения коэффициента отражения вблизи единицы. Ограниченная направленность измерительного устройства влияет на точность калибровки несколько меньше, но ее влияние становится преобладающим при измерениях малых отражений.

Еще одним источником ошибок при измерениях может стать плохое согласование генератора с исследуемой нагрузкой, в частности, когда измерительным устройством является НО с присущим ему малым затуханием в канале генератор – измерительный выход. Введение в измерительную схему дополнительного НО и выравнивающей цепи автоматической регулировки мощности (АРМ) уменьшает влияние рассогласования генератора. Однако общее улучшение согласования генератора ограничено направленностью НО и отражениями в основном канале выравнивающего ответвителя.

При использовании согласующих переходов между измерительным выходом и исследуемым двухполюсником для согласования разъемов различных размеров или типов уменьшение точности измерений обусловлено,

во-первых, ухудшением согласования измерительного выхода, во-вторых, уменьшением аффективной направленности измерительного устройства из-за отражения от согласующего перехода.

Еще одним источником ошибок при измерениях может быть наличие паразитных составляющих на других частотах в спектре сигнала генератора. Особенно трудно обнаружить их появление при измерении параметров устройств с быстро изменяющимися ЧХ. Некоторые, выпускаемые в настоящее время, генераторы содержат дополнительные следящие фильтры для предотвращения возбуждения паразитных сигналов.

Ошибки измерений, обусловленные не идеальностью параметров используемых СВЧ элементов, можно оценить с помощью стандартных нагрузок, в качестве которых используются точно рассчитанные коаксиальные и разомкнутые линии, короткозамыкатели и высокоточные скользящие нагрузки.

Стремление исключить из результата измерений погрешности, вызванные несовершенством измерительного устройства — его конечной направленностью и рассогласованием измерительного выхода, — привело к появлению метода раздвигания отражений (МРО). Этот метод является дальнейшим развитием ранее использовавшегося метода настройки НО на высокую направленность и последующего точного измерения очень малых коэффициентов отражения двух- и четырехполюсников. Существенным недостатком последнего является то, что настройка ответвителя и измерение проводятся на одной частоте.

Этот недостаток удастся преодолеть с помощью МРО, предназначенного для точного измерения АЧХ двух- и четырехполюсников, при условии, что характеристики относительно медленно изменяются с частотой.

Сущность МРО состоит в наблюдении интерференции двух сигналов; один из которых отражен от исследуемого объекта, а другой создается дополнительно вводимым источником отражения и является вспомогательным. Однако для измерения суммы и разности амплитуд интерферирующих сигналов используется не перемещение одного из источников отражения, а быстрое изменение с частотой фазы одного из сигналов, вызываемое включением дополнительного (очень длинного и изготовленного с высокой точностью) отрезка передающей линии (волноводной или коаксиальной) с номинальным волновым сопротивлением.

В этом случае в длинный отрезок передающей линии вводится дополнительный источник отражения. Введение этого отражения эквивалентно изменению аффективной направленности измерительного устройства.

Некоторые дополнительные удобства, связанные с выбором Диапазона измеряемых отражений и способа обработки результатов, дает установка, в которой на индикаторе наблюдается интерференция двух сигналов, отраженных в каналах A и B . Вспомогательным является сигнал, обусловленный конечной направленностью моста, отличием волнового сопротивления измерительного

выхода от номинального, т.е. сигнал, бывший ранее источником погрешности измерительных шумов. Фаза этого сигнала медленно меняется с частотой относительно фазы сигнала, отраженного от нагрузки и дважды прошедшего через длинный отрезок передающей линии. Включение в канал A эталонных нагрузок разной величины эквивалентно изменению эффективной направленности моста.

Для компенсации дисперсии волноводов и получения периода осцилляций, постоянного в данном частотном диапазоне, изменялся масштаб по частоте. В этом случае, так же как и в предыдущем, точность измерения коэффициента отражения была прямо связана с точностью изготовления длинной линии.

Измерение малых коэффициентов отражения четырехполюсников с малыми потерями всегда вызывает затруднение, вследствие влияния отражений от согласующих переходов и нагрузок. Типичный пример — измерение характеристик разъемов и согласующих переходов. Трудность состоит в том, что в величину измеренного коэффициента отражения исследуемого элемента входит коэффициент отражения так называемого стандартного разъема. Имеется также дополнительная трудность, состоящая в невозможности измерить характеристики только одного разъема, что требует измерения характеристик двух спаренных разъемов и деления полученного коэффициента отражения на два.

Перечисленные трудности можно устранить, пользуясь методом раздвигания отражений. Для этого к выходу измерительной установки через длинный отрезок передающей линии подключается исследуемый четырехполюсник (вместо двухполюсника), а к его выходу через второй длинный отрезок передающей линии подключается согласованная нагрузка. При этом второй отрезок линии может иметь размеры поперечного сечения, отличные от размеров сечения первого отрезка. При малых отражениях сигнал, поступающий на детектор, пропорционален векторной сумме Γ трех коэффициентов отражений: $\Gamma_{\text{в}}$ — эффективного коэффициента отражения (т.е. с учетом направленности измерительного устройства) измерительного выхода; $\Gamma_{\text{с}} = \Gamma_{\text{х}}$ — коэффициента отражения исследуемого четырехполюсника; $\Gamma_{\text{д}}$ — коэффициента отражения согласованной нагрузки и разъема на конце второй длинной линии. Ясно, что, исследуя биения на полученной ЧХ, можно определить модули (предполагая их медленное изменение с частотой) всех трех векторов.

5.7. Измерение векторных частотных характеристик двух- и четырехполюсников

5.7.1. Автоматический анализатор цепей на основе векторного вольтметра. Калибровка при измерениях характеристик двух- и четырехполюсников

Если процесс измерений управляется ЭВМ, которая также и обрабатывает результаты измерений, то векторный анализатор цепей называют автоматическим анализатором цепей (ААЦ). В состав измерительного устройства входят широкополосные направленные мосты или ответвители и переключатели, осуществляющие подключение векторного вольтметра на измерение отраженной или прошедшей волны.

Важнейшим блоком ААЦ является векторный вольтметр - двухканальное устройство с переносом частоты, в котором на промежуточной частоте сохраняется информация о модуле и фазе сигналов. Система АРУ поддерживает постоянное отношение между сигналами в опорном и измерительном каналах. Окончательное преобразование сигналов для результатов измерений графической записи либо в полярных, либо в декартовых координатах осуществляется после второго переноса частоты в низкочастотный диапазон.

ААЦ могут применяться для наблюдения характеристик, скорректированных ЭВМ, или в реальном масштабе времени, т.е. без коррекции.

Сигналы на векторный вольтметр поступают с направленных мостов или ответвителей. При измерении параметров двухполюсников эти сигналы a_1 и a_2 в общем случае пропорциональны амплитудам волн: a - падающей на двухполюсник и b — отраженной от него:

$$\begin{aligned} a_1 &= Aa + Bb \\ a_2 &= Ca + Db \end{aligned} \quad (5.63)$$

где A, B, C, D - комплексные константы.

При использовании в измерительном устройстве направленных ответвителей или мостов выполняются приближенные соотношения $|A| \approx |D| \approx 0$, $|B| \approx |C|$ или $|A| \approx |D|$, $|B| \approx |C| \approx 0$. Работа векторного анализатора основана на использовании отношения уравнений (5.63), которые можно записать

$$w = \frac{a\Gamma_x + \beta}{\gamma\Gamma_x + 1} \quad (5.64)$$

где $w = a_1/a_2$; $\Gamma_x = b/a$; $a = B/C$; $\beta = A/C$; $j = D/C$.

Решая (5.64) относительно Γ_x получаем:

$$\Gamma_x = \frac{\omega - \beta}{a - \gamma\omega} \quad (5.65)$$

Таким образом, если комплексные константы a , β , γ известны, то Γ_x зависит от величины отклика ω векторного вольтметра.

Автоматизированные анализаторы цепей применяются главным образом для определения параметров a , β , γ . Суть определения параметров состоит в наблюдении отклика ω при трех различных нагрузках, для которых Γ_x известно (эталонные волнового сопротивления). В результате получается система из трех уравнений, которую можно решить относительно a , β , γ .

Соотношения (5.63)—(5.65) использованы для пояснения метода измерения векторных характеристик и показывают, что при линейности измерительного устройства существует возможность провести необходимые калибровки и измерения и полностью исключить из результата измерений погрешности, вносимые измерительным устройством. На практике, однако, для вычисления калибровочных констант и результатов измерений пользуются уравнениями, позволяющими непосредственно связать калибровочные константы с величинами, характеризующими "несовершенство" измерительного устройства, и при необходимости исключить из результатов измерений погрешности, вносимые собственными разъемами устройства.

Обычно для калибровки используют согласованную нагрузку ($\Gamma_x = 0$), короткозамкатель, смещенные короткозамкатели и подвижные (фазорегулируемые) нагрузки с неизвестным или известным коэффициентом отражения. Возможно использование различных наборов калиброванных нагрузок.

Если исследуемое устройство выполнено на передающей линии (например, полосковой, микрополосковой, щелевой, копланарной и др.), отличной от линии измеряемого устройства, то переход с одного типа линий на другой неизбежно вносит дополнительную реактивность, которую необходимо учесть при калибровке.

Благодаря калибровкам, ААЦ позволяют полностью исключить влияние на результат измерений таких источников погрешностей, как конечная направленность мостов и ответвителей, отражения от разъемов, связь между выходом и входом измерительного устройства, согласование и переключение генератора. Неучтенными остаются погрешности индикации калиброванных нагрузок и вносимые неповторяемостью параметров разъемных соединений.

Так как калибровки и измерения на ААЦ проводятся в режиме свипирования частоты, наибольший вклад в погрешности индикации вносит погрешность воспроизведения частоты генератора. Для повышения

воспроизводимости частоты в ААЦ используется цепь обратной связи (ФАПЧ), осуществляющая в заданном ЭВМ наборе частот стабилизацию фазы сигнала, прошедшего по этой цепи. Введение ФАЛЧ позволяет на два порядка уменьшить относительную погрешность воспроизведения частоты и приблизительно в два раза абсолютную погрешность измерений. Точность измерения коэффициента отражения в системах без ФАПЧ характеризуется погрешностями измерения модуля

$$\pm(0,003+0,015|\Gamma|+0,01|\Gamma|^2)$$

и фазы

$$\pm(0,5^\circ+\arctg(0,003/|\Gamma|)+4 \arctg(0,015 |\Gamma|))$$

Для систем с ФАПЧ погрешности измерения равны

$$\pm(0,0015+0,005|\Gamma|+0,003|\Gamma|^2)$$

и фазы

$$\pm(0,25^\circ+\arctg(0,0015/|\Gamma|)+4 \arctg(0,005|\Gamma|))$$

при условии, что модуль коэффициента отражения четырехполосника погрешностей много меньше модуля измеряемого коэффициента отражения.

Заметный вклад в погрешности индикации вносят собственные тепловые шумы индикаторного оборудования. Вклад их в погрешность измерения можно отчасти уменьшить, усредняя результаты измерений. Такое усреднение проводилось по десяти измеренным значениям, и было обнаружено, что среднеквадратическая величина напряжения шумов стала менее 0,1 % максимально измеряемого значения для элементов матрицы рассеяния.

Выше уже отмечалось, что точность измерений зависит от точности индикатора, выбора калиброванных нагрузок, порядка проведения калибровок и измерений. На точность измерений влияет также способ обработки результатов калибровок измерений, т. е. выбор требуемого матобеспечения измерений, которое, в свою очередь, зависит от перечисленных факторов.

5.7.2. Измерение векторных характеристик на основе измерения мощности

Рассмотренный метод измерения векторных характеристик двух- и четырехполосников на основе измерения мощности был предложен несколько позже, чем метод измерения с помощью векторного вольтметра. В отличие от существующих ААЦ, в нем вместо векторных индикаторов со сложными гетеродинными схемами применяются простые индикаторы мощности. В

отличие от ААЦ с векторными вольтметрами, где в состав измерительных установок входят направленные ответвители или мосты, устройства с четырьмя выходами (восьмиполюсники), здесь используется измерительное устройство с пятью или шестью выходами, два из которых служат для подключения к генератору и исследуемому устройству, а к остальным подключены измерители мощности. Обязательным элементом схемы является ЭВМ, так как процесс обработки результатов калибровок и измерений очень трудоемок.

Предполагая только линейность измерительного устройства, можно записать выражения, аналогичные (5.63) и связывающие комплексные амплитуды a_i волн, падающих на измерители мощности, с комплексными амплитудами a и b волн падающей и отраженной от исследуемого устройства соответственно:

$$\begin{aligned} a_1 &= Aa + Bb & a_3 &= Ea + Fb \\ a_2 &= Ca + Db & a_4 &= Ga + Hb \end{aligned} \quad (5.66)$$

где A, B, C, D, E, F, G, H – комплексные константы.

Если в качестве измерителей мощности применяются диоды или болометры, их показания определяются как

$$\begin{aligned} P_1 &= |a_1|^2 = |Aa + Bb|^2 & P_3 &= |Ea + Fb|^2 \\ P_2 &= |Ca + Db|^2 & P_4 &= |Ga + Hb|^2 \end{aligned} \quad (5.67)$$

Требуется определить отношение b/a , но теперь по измеренным значениям P_1, P_2, P_3, P_4 , полагая, что постоянные $A...H$ известны, т. е. имеется система уравнений (5.67) относительно b/a .

Решение этой системы сводится к следующему. Для удобства вначале примем $B=0$, т.е. первый измеритель мощности измеряет только мощность падающей волны. Тогда, разделив второе уравнение на первое, получим: .

$$\left| \frac{A}{D} \right|^2 \frac{P_2}{P_1} = |\Gamma_x - q_2|^2, \quad (5.68)$$

где $q_2 = -C/D$.

По предположению A, D, q_2 известны, P_1/P_2 измеряется, так что неизвестно только Γ_x .

$$\Gamma_x = \frac{a\omega + \beta}{\gamma\omega + 1}, \quad (5.69)$$

где $\alpha=A/D$; $\beta=-C/D$; $\gamma=-B/D$ – новые комплексные постоянные, характеризующие двенадцатиполюсник. Тогда выражения для отношения мощностей имеют вид:

$$\begin{aligned} |\omega|^2 &= P_2 / P_1 \\ |\omega - \omega_1|^2 &= \xi P_3 / P_1, \\ |\omega - \omega_2|^2 &= \rho P_3 / P_1 \end{aligned} \quad (5.7)$$

где ω_1, ω_2 – комплексные, а ξ и ρ – действительные постоянные, получить явный вид которых не представляет труда.

Видно, что точность измерения значения Γ_x в основном определяется точностью (или ошибкой) измерения радиусов, т.е. отношений $P_2/P_1, P_3/P_4, P_4/P_1$. От индикаторов не требуется большого динамического диапазона, так как наибольшее изменение этих величин соответствует случаю, когда Γ_x движется вдоль окружности единичного радиуса. Важной особенностью двенадцатиполюсника является то, что полезный динамический диапазон при измерении коэффициента отражения или ослабления может (в зависимости от конструкции двенадцатиполюсника) достигать 40—60 дБ, а индикаторы при этом работают в гораздо меньшем диапазоне, который, как правило, не превышает 15 дБ.

5.7.3. Калибровка векторных анализаторов цепей на основе измерения мощности

Описанные методы измерения и расчета комплексного коэффициента отражения основаны на существовании такого метода калибровки, который позволяет найти точные значения параметров, характеризующих десяти- или двенадцатиполюсник. Метод калибровки должен обеспечивать удобство и быстроту (без ущерба для точности) калибровочных измерений, а также возможность расчета и запоминания калибровочных постоянных микропроцессором или настольной ЭВМ.

Методы калибровки различаются: объемом работ, которые должен провести оператор (числом различных присоединяемых нагрузок); числом используемых калиброванных нагрузок; объемом вычислений необходимых для расчета калибровочных постоянных; способом использования избыточной информации. Так как возможности микропроцессоров и настольных ЭВМ в настоящее время ограничены, вопрос о выборе способа калибровки должен решаться исходя из имеющихся возможностей. Необходимо, однако, отметить, что предпочтение следует отдать методам, использующим калиброванные нагрузки как с малым, так и с большим коэффициентом отражения, поскольку

использование нагрузок только с большим коэффициентом отражения может привести к существенным ошибкам при измерении малых отражений.

Из рассмотренных способов калибровки, видно, что часть калибровочных постоянных можно определить, пользуясь только некалиброванными нагрузками. При этом определялись калибровочные постоянные, связывающие показания измерителей мощности, подключенных к двенадцатиполоснику, с показаниями эквивалентного векторного вольтметра. Для нахождения калибровочных постоянных, определяющих параметры четырехполосника погрешностей, требовалось три калиброванных нагрузки.

5.7.4. Многополосники для векторных анализаторов цепей на основе измерения мощности

Несмотря на то, что перспективы применения десятиполосников ограничены неоднозначностью определения коэффициентов отражения, имеются публикации, касающиеся их изготовления и применения. Интерес к десятиполосникам вызван относительной простотой калибровки и расчета при их использовании, отсутствием больших требований к ЭВМ или микропроцессору, работающим в составе измерительной установки.

Хотя основное требование, предъявляемое к десятиполосникам, сводится к тому, что он должен быть линейным, для повышения точности измерений предложено два типа десятиполосников.

Первый из них по принципу действия подобен узкополосной схеме, содержащей НО для измерения амплитуды падающей волны и два зонда в передающей линии на расстоянии $\lambda/8$, позволяющие измерить векторные суммы падающей и отраженной волн со сдвигом фаз, например, 0 и 90°.

Реализуются такие десятиполосники для работы в широкой полосе частот на основе широкополосных НО. Существует конструкция коаксиального сонаправленного ответвителя, состоящего из внешней трубы и трех одинаковых проводников, симметрично закрепленных в ней с помощью диэлектрических опор и прокладок. Этот ответвитель после подключения к одному из его входов короткозамкнутой нагрузки преобразуется в десятиполосник, две точки которого расположены в плоскости Г на единичной окружности и разделены углом в 120° при предположении, что ответвитель, генератор и измеритель мощности идеально согласованы и ответвитель идеально направлен.

Такой десятиполосник удалось изготовить для работы в диапазоне 0.50...0,65 ГГц. Другая конструкция десятиполосника состоит из пяти противонаправленных ответвителей с большим переходным затуханием (около 30 дБ), одного делителя и одного 90-градусного гибридного (3 дБ) ответвителя. Сигнал одного из ответвителей с большим переходным затуханием поступает непосредственно на измеритель мощности для определения мощности падающей волны. Сигналы с остальных ответвителей пропорциональны

амплитудам падающей и отраженной волн. Они поступают на делитель и 90-градусный НО, где суммируются соответственно, в фазе и со сдвигом фазы на 90° . Так как используемые элементы: направленные ответвители и делитель – широкополосные, то с их помощью оказалось возможным перекрыть диапазон 2...8 ГГц. В комплексной плоскости Γ две q -точки расположены также на единичной окружности и отделены друг от друга углом 90° .

Для работы с десятиполюсниками требуются индикаторы мощности с большим динамическим диапазоном, поскольку q -точки расположены на единичной окружности ограниченной комплексной плоскости, в которой возможно однозначное определение коэффициента отражения, так как линия, проходящая через q -точки пересекает единичную окружность. Эти недостатки преодолены в десятиполюснике второго типа. По принципу действия он подобен узкополосной схеме, состоящей из трех зондов помещенных в передающую линию и разделенных расстоянием $\lambda/6$, т. е. на три индикатора поступают сигналы, пропорциональные векторной сумме падающей и отраженной волн со сдвигами, например, $0, 120, 240^\circ$. Широкополосный вариант этой схемы реализуется на трех симметричных, 90-градусных противонаправленных ответвителях с переходным затуханием 3 дБ и одного с затуханием 1,76 дБ, делителе мощности и фазосдвигателе. Такая схема имеет q -точки, расположенные вне единичной окружности, что уменьшает требования к динамическому диапазону индикаторов и позволяет однозначно рассчитать коэффициент отражения для любых пассивных нагрузок. Диапазон перекрываемых частот 2...4 ГГц, однако его можно существенно-увеличить благодаря широкополосности используемых элементов.

Предложено несколько схем двенадцатиполюсников, использующих НО, 90- и 180-градусные гибридные НО. Существует схема, состоящая из пяти ответвителей с переходным затуханием 27 и 30 дБ, одного делителя и одного 90-градусного гибридного ответвителя, кроме того – схема, состоящая из двух ответвителей, двух четырехлучевых и одного обычного делителя и одного гибридного ответвителя. Появление таких схем связано, по-видимому со стремлением свести к минимуму число гибридных 3-дБ ответвителей - элементов, наиболее сложных в изготовлении.

Попытки упростить схему двенадцатиполюсника и тем самым до предела удешевить его изготовление привели к созданию двенадцатиполюсников, состоящих или из нескольких (трех или четырех) последовательно включенных в линию НО или из одного микрополюсникового ответвителя с шестью входами, образованного тремя параллельными проводящими полосками над заземленной плоскостью.

Описан двенадцатиполюсник для диапазона 0,1...1,0 ГГц, образованный из четырех микрополосковых 20-дБ ответвителей.

В диапазоне 26-40 ГГц использовалось три волноводных НО с переходным затуханием 6; 3 и 3 дБ. Сложение сигналов, пропорциональных

падающей и отраженной волнам осуществляется с помощью двух сдвинутых на различные расстояния короткозамыкателей во вторичных каналах ответвителей. Для идеальных ответвителей одна q -точка расположена на единичной окружности, а две вне круга единичного радиуса.

Аналогичными свойствами, т.е. допускают сравнительно простую аналоговую обработку в реальном масштабе времени, обладают многополюсники, образованные некоторым количеством (от трех до пяти) зондов, включенных в измерительную линию. Однако обработка результатов измерений в этом случае несколько сложнее, да и широкополосность таких многополюсников ниже. По-видимому, возможности применения многозондовых схем в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах ограничены вследствие ужесточения требований к размерам зондов и точности их установки.

Работа всех рассмотренных выше двенадцатиполюсников основана на интерференции сигналов пропорциональных падающей и отраженной от нагрузки волнам после их прохождения по различным путям (с различной электрической длиной) через двенадцатиполюсник. Существует возможность получить аналогичную интерференцию в обычном рефлектометре, сдвигая каким-либо способом фазы опорного и измеряемого сигналов, поступающих на индикатор.

Так как предположения о симметрии, взаимности, отсутствии потерь в десятиполюснике, а также предположение о том, что сигнал, поступающий на четвертый индикатор, пропорционален амплитуде падающей волны, на практике выполняются достаточно хорошо, то проблема достижения квазиоптимального расположения q -точек в широком диапазоне частот сводится к решению симметричного соединения с пятью входами. Показано, что кольцевая планарная конструкция с симметрично расположенными отводами и отрезками короткозамкнутых линий дает удовлетворительное согласование (потери на отражение 20 дБ) в полосе частот 10 %. Перекрытие несколько большее чем в одну октаву удалось получить, используя не кольцевую, а круговую структуру стыка, так как она имеет более низкую реактивность. Однако для улучшения согласования потребовалось подводящие линии подключить через отрезки согласующих однородных линий небольшой длины с более низким волновым сопротивлением. Таким способом удалось создать два пятиходовых соединения для работы в диапазонах 5... 12,5 и 8... 18 ГГц.

Многополюсники с числом входов более шести, в настоящее время используются сравнительно редко, поскольку полная обработка результатов измерений в реальном масштабе времени еще недоступна имеющимся микропроцессорам и настольным ЭВМ. Цель, которая преследуется при их использовании, - расширение динамического диапазона или некоторое повышение точности при простейшей цифровой или аналоговой обработке

результатов. Предложены конструкции многополюсников, в которых использованы гибридные ответвители, реализуемые в миллиметровом диапазоне диэлектрическими пластинами, расположенными под углом 45° к направлению распространения волны. Четырнадцатиполюсник образован одним ответвителем с пятью связанными гребневыми линиями. К двум его входам присоединяются генератор и исследуемая нагрузка, к четырем - индикаторы мощности, к трем - отражающие нагрузки и к одному - нагрузка и индикатор. Величины нагрузок подбираются на ЭВМ так, чтобы получить оптимальное расположение q-точек.

5.7.5. Установки для измерения параметров двух- и четырехполюсников на основе измерения мощности

Созданные в настоящее время и описанные различные измерительные установки, хоть и охватывают частоты от 10 МГц до 96 ГГц, на которых работают серийно выпускаемые ААЦ на основе векторных вольтметров; имеют уникальный характер и собираются из доступного различным лабораториям оборудования. Различны и цели, с которыми создаются эти установки. Если для метрологических лабораторий, таких, как Национальное Бюро Стандартов, Армейский метрологический и Калибровочный центр (США) и др., основная цель - достижение предельной точности, а время, затрачиваемое на измерения, - фактор второстепенный, то для обычных исследовательских лабораторий основной целью является снижение стоимости измерений при менее строгих требованиях к точности, но обязательно графическое представление результатов в реальном масштабе времени, допускающее выполнение настроечных работ в широком диапазоне частот с немедленным наблюдением эффекта настройки. Предельную точность можно достичь на установках с двумя двенадцатиполюсниками, требующих для калибровки минимального числа стандартов волнового сопротивления. Добиться работы установки в реальном масштабе времени удастся, используя один двенадцатиполюсник и простейшие (менее точные) процедуры калибровки и расчета. В состав всех измерительных установок входят: СВЧ оборудование, система обработки и преобразования данных, система контроля и обработки данных.

СВЧ оборудование состоит из генератора, перестраиваемого по сигналам ЭВМ, цифрового частотомера с возможностью фазовой стабилизации генератора при необходимости точного измерения частоты, одного или двух двенадцатиполюсников и индикаторов (датчики) мощности. В качестве датчиков мощности используются болометры, термисторы, имеющие в широком динамическом диапазоне характеристики очень близкие к квадратичным или диодные детекторы, в частности, диоды с барьером Шотки. Для повышения стабильности измерений используется температурная стабилизация термисторов или диодов с погрешностью до сотых долей градуса или их включение в мостовые самобалансирующиеся схемы. Несмотря на

хорошую квадратичность термисторов, они имеют недостаток: обычно требуемая для их работы мощность лежит в интервале 1...10 мВт, что может потребовать от генератора мощности 0,1...1,0 Вт. Тогда сигнал с генератора обычно мощностью около 10 мВт должен быть усилен, что может стать дополнительным источником погрешностей, обусловленных шумами усилителя. Мощность, требуемая для работы диодных детекторов, обычно 10 мкВт и ниже. Это делает весьма привлекательным их применение на частотах, где усилители дорогостоящи и имеют высокий уровень шумов. Компенсацию неквадратичности диодов можно получить при обработке данных в ЭВМ, используя паспортные данные диодов. Более точная компенсация неквадратичности достигается, если в схему измерительной установки ввести один термистор и по нему прокалибровать диоды, запомнив калибровочную таблицу в ЭВМ. В состав измерительного оборудования установок с двумя двенадцатиполосниками входят еще переключаемые фазосдвигатель и аттенюатор, необходимые для калибровки. Их переключение осуществляется электромеханическими переключателями по командам и под контролем ЭВМ.

Система сбора и преобразования данных должна, преобразовывать сигналы от датчиков меткости из аналоговой в цифровую форму и вводить их в ЭВМ для дальнейшей цифровой обработки, а также выводить окончательные результаты и представлять их в требуемой форме (в виде напечатанной таблицы или графиков, действительной и мнимой частей коэффициента отражения в декартовых координатах или комплексного коэффициента отражения на диаграмме Вольперта - Смита). В состав системы сбора и преобразования данных входят малозумящие предварительные усилители для усиления сигналов с датчиков, мультиплексор, осуществляющий по сигналам от ЭВМ последовательное подключение выходов предварительных усилителей на вход управляемого ЭВМ регулируемого усилителя. Сигналы с регулируемого усилителя преобразуются в цифровую форму в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) и подаются на ЭВМ. Регулируемый усилитель необходим, чтобы полностью использовать точность АЦП. По команде от ЭВМ его усиление изменяется до тех пор, пока наибольшее из показаний индикаторов не будет лежать во второй половине шкалы АЦП.

В задачи системы контроля и обработки данных входит контроль и установка частоты генератора, контроль и управление системой сбора и преобразования данных хранение результатов калибровки, расчет параметров исследуемых двух- или четырехполосников. Она также генерирует временные сигналы для системы сбора и преобразования данных, модулирует сигнал СВЧ-генератора и синхронно демодулирует сигналы с детекторов. Выполняет эти задачи ЭВМ с соответствующим матобеспечением. В качестве ЭВМ, как правило, используется настольная (персональная) ЭВМ или микропроцессор.

Сравнение установок, предназначенных для измерения параметров двух- и четырехполосников на основе векторных вольтметров и на основе

измерения мощности, показывает, что для первых требуется более дорогостоящее СВЧ оборудование, а для вторых — более сложное матобеспечение.

Некоторые факторы, влияющие на точность, уже упоминались выше. Это расположение q -точек на комплексной плоскости, разрядность АЦП, точность представления чисел в ЭВМ, наличие шумов в сигнале генератора, которое при уровне шумов -30 дБ относительно основного сигнала может привести к погрешности до $0,2\%$ при измерении нагрузок, у которых $|\Gamma_x|=1$. На точность влияют также линейность АЦП, точность, с которой известны характеристики детекторов, продолжительность усреднения показаний детекторов, уменьшающая уровень шумов, независимость согласования детекторов от уровня СВЧ сигнала. Учитывая, что все перечисленные факторы (за исключением положения q -точек) присутствуют и в ААЦ на основе векторных вольтметров, но в последних имеются и дополнительные источники ошибок, связанные с преобразованием частоты, можно сделать вывод, что потенциально ААЦ на основе измерения мощности являются более точными. Следовательно, для оценки точности метода на основе измерения мощности нельзя использовать серийно выпускаемые ААЦ с векторными вольтметрами. Поэтому для определения точности пользуются двумя другими методами. Первый, позволяющий получить абсолютную погрешность, состоит в измерении параметров известных двух- и четырехполюсников — высокоточных короткозамыкателей и прецизионных аттенюаторов. Второй, не требующий высокоточных измерительных стандартов и называемый "экспериментами на соответствие" состоит в следующем:

- 1) измеряются параметры рассеяния группы двух- и четырехполюсников;
- 2) эти устройства объединяют в пары и измеряют параметры рассеяния этих пар;
- 3) параметры этих же пар рассчитывают, исходя из результатов измерений, полученных в пп. 1);
- 4) между результатами, полученными в пп.2) и 3) находят разность, которая является количественной мерой несоответствия результатов измерений одиночных и спаренных элементов и косвенной оценкой погрешности измерений.

Среди рассмотренных методов измерения S – параметров в СВЧ диапазоне авторы выделяют две группы методов: гетеродинные и гомодинные.

Гетеродинные методы измерения базируются на выделении с помощью направленных ответвителей (или устройств, выполняющих их функции) падающей, отраженной (прошедшей) волн с последующим переносом КВЧ сигналов на низкую промежуточную частоту с сохранением информации о модуле и фазе. Это происходит путем смещения измерительного сигнала с сигналом второго КВЧ генератора (гетеродина). Внутри группы методы

различаются способом и числом преобразований сигнала до низкой частоты, на которой проводятся измерения, а также конфигурацией КВЧ тракта. Анализ литературных источников показал, что наиболее распространенным способом построения гетеродинных АЦ ММДВ является перенос измерений в диапазон рабочих частот серийных АЦ СДВ с помощью гетеродина, работающего на фиксированной частоте. Разрабатываются также схемы анализаторов с двойным преобразованием частоты, с преобразованием на малых гармониках гетеродина и с использованием умножителей частоты.

На основе гетеродинных методов разработаны серийные АЦ, работающие в диапазоне частот 18-100 ГГц и имеющие широкий динамический диапазон (70...100 дБ), а также высокую точность измерения амплитудных и фазовых параметров (разрешающая способность по амплитуде 0,001 дБ и по фазе 0,01°).

В то же время гетеродинные методы измерения характеризуется высокой схемотехнической сложностью КВЧ тракта (наличие двух и более преобразователей частоты, гетеродина, схемы фазовой автоподстройки частоты), высокими требованиями к параметрам отдельных компонентов этого тракта, и поэтому реализация их в диапазоне свыше 40 ГГц связана с большими техническими затратами.

Напротив, в гомодинных АЦ решение большинства измерительных задач перенесено с высокочастотного уровня на уровень обработки данных, что приводит к относительно простым КВЧ измерительным трактам, но более сложным алгоритмам калибровки и обработки измерительной информации. Поэтому более перспективным в ММДВ является использование гомодинных методов, в которых амплитуда и фаза измерительного сигнала определяется либо через интерференцию сигналов в многополюсном рефлектометре, либо через смещение на нелинейном элементе предварительно промодулированного измерительного сигнала с когерентным немодулированным опорным сигналом. При этом оба сигнала исходят из одного источника и являются, поэтому одинаковыми по частоте (гомодинны). Соответственно этому гомодинные АЦ выполняются на основе многополюсных (чаще всего двенадцатиполюсных) рефлектометров или на основе гомодинных детекторов.

Отметим только специфические трудности, возникающие при их реализации в ММДВ. К ним можно отнести сложность технической реализации широкополосных многополюсных рефлектометров, сильную частотную зависимость ("изрезанность") собственных параметров и связанные с этим трудности обеспечения необходимых амплитудно-фазовых соотношений интерференционных сигналов одновременно на нескольких измерительных преобразователях, а также многоканальность.

Более перспективными являются методы второй группы на основе гомодинных детекторов, которые сочетают в себе простоту аппаратного

обеспечения гомодинных систем с потенциально высокой точностью и чувствительностью гетеродинных.

Среди них наибольшее распространение получил метод модуляции одной боковой полосы. Благодаря высокой точности, чувствительности и широкому динамическому диапазону, в ММДВ эти системы используются в качестве образцовых средств измерений и в серийно выпускаемых установках типа ДК1-19, предназначенных для метрологических целей.

Используется также метод с двухполосной модуляцией и однополосным детектированием, который в литературе часто называется методом модулированной поднесущей, а отдельные разновидности - методом Кона. Упрощенный метод Кона, разработанный Чупровым И. И., был реализован в серийных приборах рассматриваемого диапазона Р4-62, Р4-63. Получен динамический диапазон 60 дБ и погрешность измерения фазы не более $\pm 10^\circ$. К недостаткам этих методов следует отнести высокие требования к параметрам КВЧ узлов и сложность трактов.

Проведенный анализ показал, что гомодинные методы измерения представляют собой технически более целесообразную альтернативу гетеродинным методам для использования их в ММДВ. Однако существенным недостатком известных до сих пор гомодинных методов является то обстоятельство, что высокую точность с приемлемыми затратами можно получить лишь в относительно узких диапазонах частот. К тому же необходимая точность измерения при использовании многополосных рефлектометров достигается усложнением калибровки и ограничивается неидентичностью и нестабильностью параметров большого количества датчиков мощности, а при использовании второй группы методов точность измерения сильно зависит от качества используемых КВЧ компонентов.

Общим существенным недостатком всех этих измерителей является многоканальность СВЧ тракта на участке преобразования частоты или детектирования.

Для устранения этого недостатка перспективно использование коммутационного метода. Этот метод нашел широкое распространение в НЧ диапазоне. При коммутационном методе происходит поочередное преобразование сигналов в одном канале, одними и теми же звеньями. Благодаря этому снижается погрешность преобразования, т.к. автоматически удовлетворяется условие их амплитудной и фазовой идентичности. Как следствие исключается необходимость подбора идентичных элементов. Точность измерительных устройств при таком преобразовании существенно повышается, и они становятся не критичными к внешним возмущающим факторам и к нестабильности элементов.

Возможность применения коммутационного метода при измерениях в СВЧ диапазоне обусловлена существенным улучшением в последнее время параметров коммутационных СВЧ элементов: увеличением их быстродействия,

стабильности характеристик и т.п. Особенно широкое внедрение в СВЧ технику получили р-і-п диоды, обладающие уникальными во многих отношениях свойствами. Коммутационные СВЧ элементы на их основе работают на частотах до десятков гигагерц и облагают высоким быстродействием (сотни килогерц).

При измерениях S -параметров в СВЧ диапазоне волн можно выделить два вида коммутаций - первичную и вторичную. Первичная коммутация служит для обеспечения возможности измерения всего комплекса S-параметров с минимальными потерями времени на пересоединения в СВЧ тракте и может быть решена путем построения так называемых кольцевых трактов. Первичная коммутация может быть с очередным или одновременным распространением СВЧ волн через ИУ в противоположных направлениях. В кольцевых трактах измерителей с переносом частоты используется поочередное распространение волн, при котором амплитуды волн, падающих на ИУ в противо-положных направлениях, меняют свои значения от минимального (близкого к 0) до максимального. В кольцевых трактах гомодинных измерителей используется одновременное распространение волн, но происходит изменение фазы одной из волн, падающей на вход или выход ИУ, за счет коммутаций в дискретном фазовращателе (ДЗВ), включаемом в канал распространения этой волны. Вторичная коммутация используется для нахождения комплексного отношения сигналов, несущих информацию об одном из S-параметров ИУ, и имеет место уже по отношению к СВЧ сигналам, прошедшим через ИУ. Она также может осуществляться в опорном или измерительном каналах, но на участках с выделенными сигналами (например, НО или мостами).

На рис. 5.10 приведена структурная схема кольцевого СВЧ тракта применяемого в измерителях с переносом частоты. Схема содержит два рефлектометра, ориентированных на ответвление сигналов противоположных направлений, и два СВЧ переключателя. Переключатель П1 обеспечивает подачу сигналов на входы рефлектометров во взаимно противоположных направлениях, т.е. осуществляет первичную коммутацию. Назначение переключателя П2 - поочередное подключение ответвленных сигналов, пропорциональных коэффициентам передачи и отражения исследуемого устройства S_x , к входам двухканального векторного измерителя отношения, т.е. осуществление вторичной коммутации. Если записать систему волновых уравнений в виде

$$\begin{aligned}
 b_{1,1} &= a_{1,1}S_{11} + a_{2,1}S_{12} \\
 b_{2,1} &= a_{1,1}S_{21} + a_{2,1}S_{22} \\
 b_{1,2} &= a_{1,2}S_{11} + a_{2,2}S_{12} \\
 b_{2,2} &= a_{1,2}S_{21} + a_{2,2}S_{22}
 \end{aligned}
 \tag{5.71}$$

где $a_{1,1}$, $a_{2,1}$, $b_{1,1}$, $b_{2,1}$ - комплексные нормированные волны при распространении в тракте прямой волны; $a_{1,2}$, $a_{2,2}$, $b_{1,2}$, $b_{2,2}$ - комплексные нормированные волны при распространении в тракте обратной волны, и учесть, что при поочередном распространении волн $a_{1,2}=0$ и $a_{2,1}=0$, то

$$S_{11} = \frac{b_{1,1}}{a_{1,1}}; S_{21} = \frac{b_{2,1}}{a_{1,1}}; S_{12} = \frac{b_{1,2}}{a_{2,2}}; S_{22} = \frac{b_{2,2}}{a_{2,2}}, \quad (5.72)$$

т.е. определяется весь комплекс S-параметров исследуемого устройства. Подобные схемы обычно конструируются в виде блоков с возможностью выбора исследуемого параметра (управления переключателями с помощью кнопки на передней панели или дистанционно).

Дальнейшее развитие коммутационного метода на СВЧ заключается в использовании коммутационно-модуляционного метода, разработанного и развитого для НЧ. Суть его заключается в поочередном периодическом вводе исследуемых сигналов в одноканальный преобразовательный тракт с заданной частотой коммутации. При этом образуются модулированные по амплитуде или фазе сигналы, содержащие измерительную информацию в огибающей частоты коммутации или спектральных составляющих колебаний. Применительно к СВЧ изкверениям это позволяет перейти от одновременного сравнения опорного и измерительного сигналов к разновременному сравнению, осуществляемому с некоторой частотой переключения.

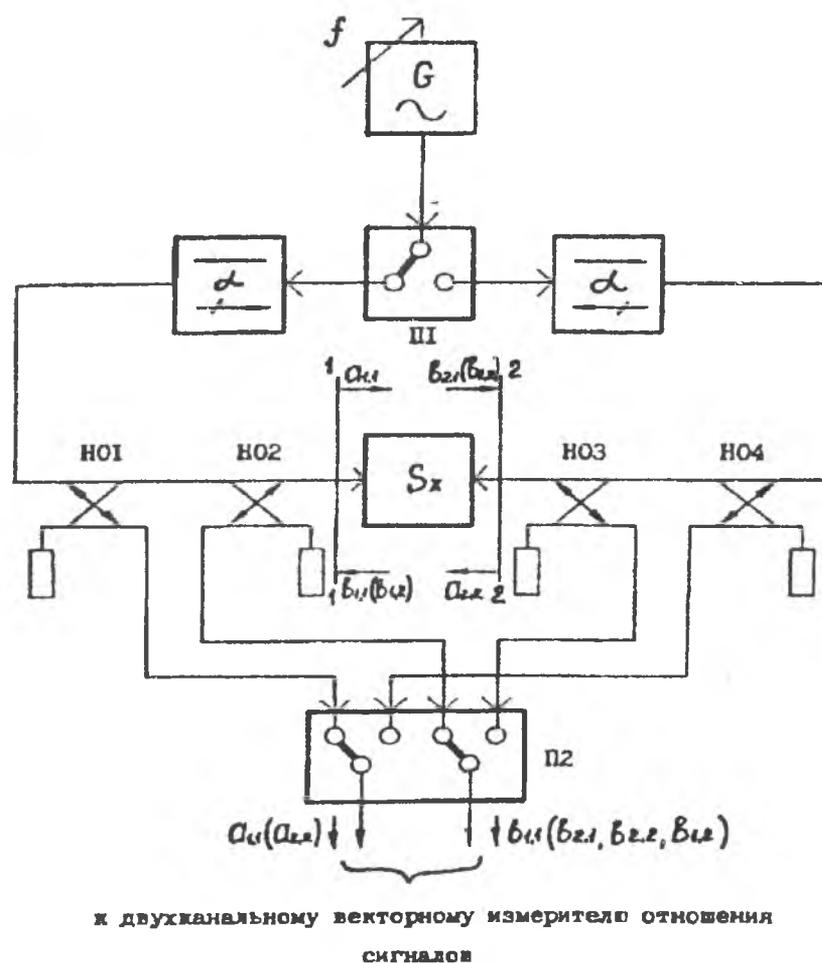


Рис. 5.10. Структурная схема кольцевого СВЧ тракта в измерителях с переносом частоты

Возможность получения информации об S-параметрах основана на том, что прямая и обратная волны в кольцевом СВЧ тракте представляются как амплитудно-манипулированные единичными коммутирующими функциями $F_1(t)$ и $F_2(t)$ с частотой f (периодом T), сдвинутыми друг относительно друга на половину периода

Тогда система волновых уравнений будет иметь вид

$$\begin{aligned} b_1(t) &= S_{11}a_1F_1(t) + S_{12}a_2F_2(t) \\ b_2(t) &= S_{21}a_1F_1(t) + S_{22}a_2F_2(t) \end{aligned} \quad (5.73)$$

Откуда для интервала времени $0 < t < T_1/2$

$$S_{11} = \frac{b_1(t)}{a_1}; S_{21} = \frac{b_2(t)}{a_1}$$

и для $T_1/2 < t < T_1$

$$S_{21} = \frac{b_1(t)}{a_2}; S_{22} = \frac{b_2(t)}{a_2}$$

Задача получения информации о значениях комплексных отношений

$$S_{11} = \frac{b_1(t)}{a_1}; S_{21} = \frac{b_2(t)}{a_1}; S_{21} = \frac{b_1(t)}{a_2}; S_{22} = \frac{b_2(t)}{a_2} \quad \text{при вторичной}$$

коммутации была решена только в отношении фазовых параметров за счет применения специального одноканального быстродействующего фазометра. Коммутирующее напряжение формируется из прямоугольных импульсов положительной и отрицательной полярностей, причем длительности импульсов не равны между собой и зависят от значения фазового сдвига между входными сигналами.

Одноканальность на участке преобразования частоты и высокое быстродействие (частота коммутации может быть выбрана порядка 10 кГц) является существенными достоинствами коммутационно-модуляционного метода.

Необходимость в одновременном распространении волн через ИУ является одним из основных недостатков кольцевых трактов измерителей с двенадцатиполосными рефлектометрами.

В гомодинных измерителях для устранения многоканальности на участке преобразования частоты используется и вторичная коммутация. Например, она применяется в четырехщелевых односторонних датчиках, которые являются модернизированным вариантом четырехзондовых датчиков. Однако один из основных недостатков таких датчиков узкополосность - сохраняется.

В последнее время предложены новые варианты построения гомодинных измерителей коммутационного типа, в которых вторичная коммутация осуществляется с помощью ДФВ, расположенных в опорном или измерительном каналах СВЧ тракта. Выходные СВЧ каналы опорного и измерительного каналов смешиваются в амплитудно-фазовых дискриминаторах различных конструкций. Такое построение СВЧ тракта измерителя позволяет существенно уменьшить количество контрольных мер S -параметров (например, в случае использования четырех ДФВ количество контрольных мер минимально - одна).

Применение первичной и вторичной коммутации позволяет, во-первых, обеспечить возможность измерения всего комплекса S -параметров с минимальными затратами времени на пересоединения в СВЧ тракте, и, во-вторых, устраняет многоканальность на линейном участке преобразования сигнала. Задача может быть решена с помощью коммутационных измерителей с переносом частоты, а также при разработке таких структур гомодинных измерителей, которые позволили бы сохранить все достоинства измерителей на базе двенадцатиполусных рефлектометров и вместе с тем устранили бы недостатки, связанные с одновременностью распространения волн в противоположных направлениях.

5.8. Панорамные измерители КСВН и ослабления (ПИКО) в миллиметровом диапазоне волн

В основе принципа действия панорамных измерителей КСВН и ослабления лежит рефлектометрический метод измерения, использующий выделение посредством направленных ответвителей (или делителей) падающей и отражённой от измеряемого объекта волн при измерении КСВН или падающей и прошедшей измеряемое устройство волн при измерении ослаблений с последующим определением коэффициентов отражения и передачи по величине отношения этих волн (сигналов). В зависимости от способа получения величины отношения этих сигналов исследовались три основные схемы прибора:

схема с автоматической регулировкой мощности (АРМ) ГКЧ и индикатором прямого усиления;

логометрическая схема, использующая в качестве индикатора измеритель отношения с источником СВЧ мощности без системы АВМ;

комбинированная схема, содержащая ГКЧ с системой АРМ и измеритель отношения.

Проведённые подробные исследования этих вариантов построения схем прибора показали, что наиболее приемлемой структурной схемой является комбинированная схема с ГКЧ, охваченным системой АРМ, и измерителем отношений в качестве индикатора. В такой схеме остаточная нестабильность выходной мощности генератора из-за несовершенства цепи обратной связи

компенсируется измерителем отношений, а наличие АРМ улучшает условия работы детекторных устройств. Из-за ограниченного динамического диапазона квадратичности характеристик СВЧ диодов возникают погрешности неквадратичности, и при отсутствии схемы АРМ диапазон измерения дополнительно сужается на величину перепадов мощности генератора.

Комбинированная структурная схема лежит в основе практически всех панорамных измерителей КСВН и ослаблений миллиметрового диапазона волн, разработанных и серийно выпускавшихся в последние двадцать лет.

Типичная структурная схема такого измерителя параметров цепей приведена на рис. 5.11.

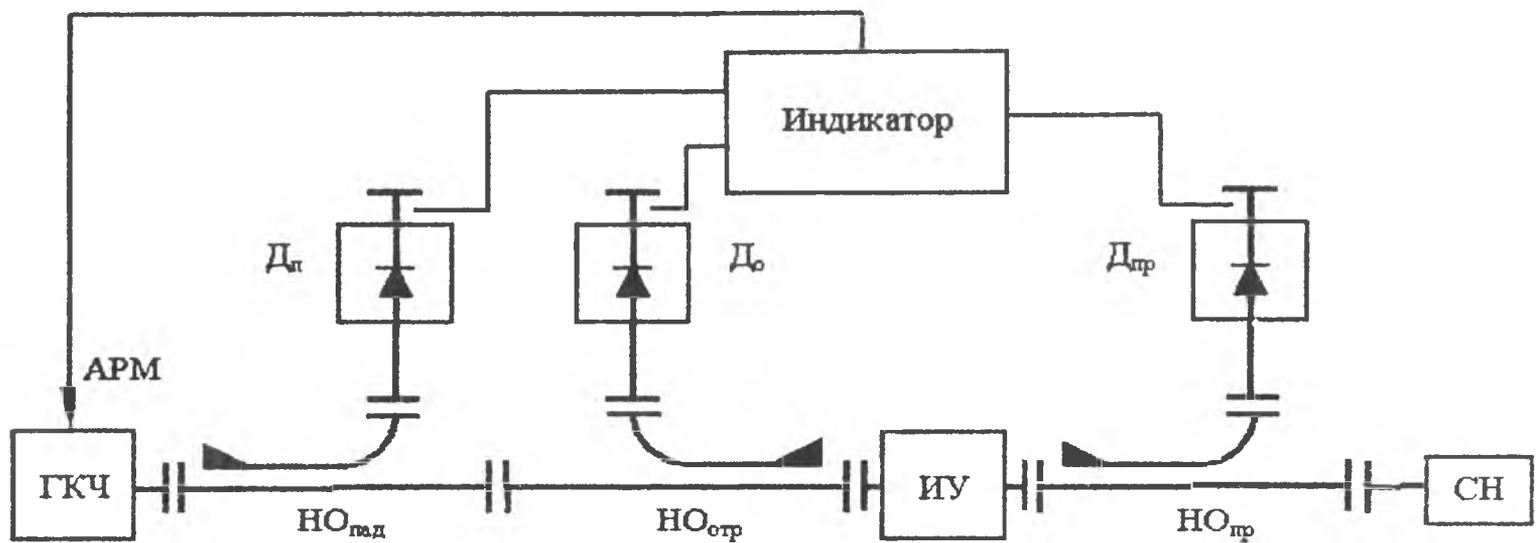


Рис. 5.11. Типичная структурная схема ПИКО

В качестве перестраиваемых источников СВЧ мощности в ПИКО миллиметрового диапазона волн используют ГКЧ на ЛОВ, перекрывающие по частоте рабочий диапазон частот волновода стандартного сечения. Для обеспечения возможности работы со стандартными измерителями отношений в ГКЧ предусмотрена схема модуляции СВЧ сигнала меандром (обычно с частотой модуляции 100 кГц и скважностью 2). Модуляция осуществляется по управляющему электроду ЛОВ. Система АРМ, в которую входит внешний датчик и усилитель АРМ, обеспечивает уменьшение неравномерности уровня выходной мощности ГКЧ до величины $\pm(2-3)$ дБ.

В качестве индикаторов в серийно выпускавшихся ПИКО миллиметрового диапазона использовались измерители отношений типа Я2Р-70.

Новые возможности по автоматизации ПИКО, по обработке, хранению и представлению (отображению) измерительной информации в цифровом виде в последние годы связаны с применением в измерительных схемах анализаторов цепей миллиметровых волн персональных компьютеров.

Панорамные измерители КСВН и ослабления относятся к скалярным анализаторам цепей (САЦ), поскольку не позволяют измерять фазовые характеристики параметров цепей, только амплитудные.

В таблице 5.1 приведены параметры выпускавшихся ПИКО миллиметрового диапазона волн.

Таблица 5.1

Параметры панорамных измерителей КСВН и ослабления

| | | | | | | |
|--|------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Тип прибора | P2-66 | P2-65 | P2-68 | P2-69 | P2-124 | P2-123 |
| Страна | СССР | СССР | СССР | СССР | СССР | СССР |
| Диапазон частот, ГГц | 17,44 – 25,86 | 25,86 – 37,5 | 37,5 – 53,57 | 53,57 – 78,33 | 78,33 – 118,1 | 129,2 – 142,8 |
| Сечение тракта, мм | 11x5,5 | 7,2x3,4 | 5,2x2,6 | 3,6x1,8 | 2,4x1,2 | 1,6x0,8 |
| Погрешность установки частоты, % | ±0,5 | ±0,5 | ±0,3 | ±0,3 | ±1 | ±1 |
| Диапазон измеряемых КСВН | 1,06 – 5,0 | 1,06 – 5,0 | 1,1 – 5,0 | 1,1 – 5,0 | 1,1 – 5,0 | 1,1 – 5,0 |
| Погрешность измерения КСВН в диапазоне значений 1,2 – 2,0, % | ±(5K+2) | ±(5K+2) | ±(5K+2) | ±(5K+2) | ±(5K+6) | ±(5K+2) |
| Диапазон измеряемых ослаблений, дБ | -35 ÷ 0 | -35 ÷ 0 | -35 ÷ 0 | -30 ÷ 0 | -30 ÷ 0 | -30 ÷ 0 |
| Погрешность измерения ослабления, дБ | ±(0,5+ 0,05A) | ±(0,5+ 0,05A) | ±(0,75+ 0,05A) | ±(0,75+ 0,05A) | ±(0,6+ 0,06A) | ±(0,6+ 0,06A) |

5.9. Измерение эффективности экранирования

Экранирование РЭА является одним из средств уменьшения паразитного излучения, улучшения характеристик радиоаппаратуры в отношении ее восприимчивости к помехам и уменьшения внутренних паразитных связей между отдельными элементами и узлами РЭА. В соответствии с этим для определения экранирования необходимо измерить:

абсолютный уровень помех, излучаемых испытываемым устройством;

абсолютный уровень помех, воздействующих на РЭА при определении ее восприимчивости к помехам;

степень уменьшения помех с помощью экранов.

Экранироваться могут целые здания и отдельные помещения, в которых работает РЭА. Как правило, экранируются отдельные радиоустройства и их блоки, часто отдельные функциональные узлы, а иногда и их элементы. Экранирование зданий, отдельных помещений и радиоустройств обеспечивает биологические нормы излучения, отсутствие вредного влияния электромагнитных колебаний на человеческий организм, а также улучшение электромагнитной совместимости и радиомаскировки аппаратуры и радиосистем в целом. Измерения в этом случае ведутся в дальней зоне, т.е. в зоне, где поле носит характер плоской волны. Измеряются абсолютные значения полей или абсолютные значения плотности потока энергии. При этом используется та же аппаратура и те же методы, которые применяются при вышеописанных исследованиях и испытаниях антенн. Наиболее употребительным является метод с использованием антенны, к выходу которой подсоединяется селективный вольтметр, измерительный приемник или измеритель малой мощности. На частотах ниже 1 ГГц используются штыревые антенны, а в более высокочастотных диапазонах предпочтительны рупорные. Если измерения проводятся с помощью рупорной антенны, и используется измеритель малой мощности, то по показаниям последнего $P_{изм}$ определяется плотность потока мощности $P_{ср} = P_{изм}/S_{д}$. На практике чаще интересуются не величиной $P_{ср}$, а амплитудой напряженности электрического поля.

При измерениях внутри здания следует обращать внимание на возможность образования стоячих волн и измерения проводить в местах максимума стоячей волны. При исследованиях радиоустройств (передатчиков, СВЧ-трактов, приемников и др.), их отдельных блоков, узлов и элементов измерения проводят в непосредственной близости от мест, где вероятнее всего следует ожидать утечку энергии. Примерами таких мест, где наиболее вероятно нарушение экранировки (электрогерметичности), могут быть соединения отдельных элементов и узлов, вентиляционные отверстия, места установки измерительных приборов, непропаиваемые щели и др. Главной особенностью измерений в непосредственной близости от излучателя, или в ближней зоне, является то, что магнитное и электрическое поля не связаны такой простой временной, пространственной и амплитудной зависимостями, как в дальней зоне, где они синфазны, их векторы перпендикулярны друг другу, а амплитуды связаны так называемым характеристическим сопротивлением волны в свободном пространстве, равным 377 Ом. Поэтому, строго говоря, при определении абсолютных значений напряженностей полей в ближней зоне следовало бы измерять отдельно как электрические, так и магнитные составляющие поля.

На практике, как правило, ограничиваются измерением либо электрического, либо магнитного поля. При измерениях электрического поля используют штыревые антенны, а при измерениях магнитного – рамки. Используют рамки в двух случаях: прежде всего, когда необходимо измерить именно магнитное поле (например, экранирование электронно-лучевых трубок), а также в случае измерения достаточно низких частот, когда штыревые антенны имеют большие размеры. Увеличивая число витков рамки и, более того, применяя сердечники из ферромагнитного материала, можно получить малые размеры и большую чувствительность антенного устройства. Рамки используют всегда с электростатическим экраном, чтобы избежать действия электрического поля.

5.10. Методика проведения измерений параметров гибких электромагнитных экранов

При исследовании электромагнитных свойств материалов в радиочастотном диапазоне необходимо производить деление частотного диапазона от десятков кГц до 300 ГГц на несколько поддиапазонов, отличающихся условиями распространения радиоволн, а также используемой измерительной аппаратурой и методикой измерений. На низких частотах для передачи сигналов используются прямые проводники и витые пары, при увеличении частоты до сотен МГц необходимо применять коаксиальную технику, а на частотах сантиметрового и миллиметрового диапазона – волноводные системы передачи. В качестве излучающих и приемных устройств применяются различные типы антенн: логопериодические, дипольные, рупорные и т.д., настроенные на определенный участок частотного диапазона. На практике невозможно провести измерения характеристик экранов в широком диапазоне частот с помощью одного универсального измерителя. Поэтому измерения проводились в диапазонах 0,01-30 МГц, 30-1000 МГц, 1,5-18 ГГц, 18-37, и 78-118 ГГц.

Измерения в диапазоне 0,01-1000 МГц проводились с использованием коаксиальной измерительной линии, а в диапазоне 1,5-37 и 78-118 ГГц – с помощью измерителей СВЧ параметров четырехполосников.

Параметры материалов можно характеризовать по эффективности экранирования ЭМИ и коэффициенту отражения ЭМИ от экрана. В частотном диапазоне до 1 ГГц проводились измерения эффективности экрана по электрической и магнитной составляющей ЭМИ и коэффициента отражения излучения от трикотажного полотна, а в СВЧ диапазоне частот было удобно использовать автоматизированные измерители S-параметров четырехполосников, в качестве которых выступают исследуемые образцы трикотажных экранов, позволяющие получать необходимую информацию об эффективности экрана и его отражающих и поглощающих свойствах [323].

Исследования экранов связаны с измерением эффективности экранирования, то есть с измерением напряженности электрической и магнитной составляющей электромагнитного поля в одной и той же точке пространства до и после установки экрана. Допущения, связанные с пренебрежением незначительным затуханием электромагнитного излучения в свободном пространстве (воздухе) по сравнению с ослаблением излучения, обеспечиваемым материалом экрана, позволяют использовать упрощенную методику измерения эффективности. В этом случае измеряется модуль коэффициента прямой передачи пассивного четырехполюсника $|S_{21}|$, который определяется с помощью автоматизированного векторного анализатора цепей. Он принимается в качестве оценки эффективности экрана, так как по определению коэффициент прямой передачи равен отношению комплексного значения напряженности электромагнитного поля на выходе четырехполюсника к ее значению на входе:

$$S_{21} = \frac{H_2}{H_1}, \quad (5.74)$$

где H_1 и H_2 – напряженности поля на входе и выходе четырехполюсника, соответственно.

При этом значение напряженности в точке пространства за экраном после его установки и значение поля на выходе пассивного четырехполюсника, в виде которого выступает экран, оказываются одной и той же величиной, а значения модуля напряженности поля в той же точке пространства до установки экрана и на его входе отличаются на величину затухания поля в среде распространения:

$$|H_1| = |H_2| e^{k''x}, \quad (5.75)$$

где H_1 – напряженность поля в точке пространства непосредственно перед экраном,

H_2 – напряженность поля в точке пространства за экраном до его установки.

При переходе к эффективности экранирования, сравнивая формулы 5.21 и 5.22, видно, что эффективность экранирования и модуль коэффициента передачи связаны соотношением:

$$\mathcal{E} = |S_{21}| e^{-k''x}. \quad (5.76)$$

В свободном пространстве коэффициент затухания k'' равен нулю и эффективность становится равной модулю коэффициента передачи. В случае

распространения излучения в воздухе при малых расстояниях между излучателем и приемником ($x \rightarrow 0$) величина затухания мала. С учетом того, что мощность излучателя постоянна для всех измерений, эффективность экранирования однозначно определяется величиной модуля коэффициента передачи с постоянной погрешностью, не превышающей 0,1 % при эффективности экрана 30 дБ.

Для проведения измерений S-параметров образцов материалов использовалась линейка Векторных Анализаторов Цепей: VNA 1.5-18 в диапазоне частот 1,5 ГГц - 18 ГГц; VNA 17-25 в диапазоне частот 17 ГГц – 26 ГГц и VNA 25-37 в диапазоне частот 25 ГГц – 37 ГГц. Первые два анализатора цепей сконструированы на основе модернизированных измерительных приборов Р4-53 (1,5 ГГц – 18 ГГц) и Р4-62 (17,44 ГГц – 25,95 ГГц) с сохранением всех метрологических характеристик прототипов. Пределы допустимой основной погрешности измерения модуля коэффициента передачи ΔA_x , его фазы $\Delta \varphi_{Ax}$, коэффициента стоячей волна напряжения (КСВН) δK_{CTU} и фазы коэффициента отражения $\Delta \varphi_{Гx}$ в диапазоне частот 1,5 ГГц – 18 ГГц и в диапазоне частот 17,44 ГГц – 25,95 ГГц:

$$\Delta A_x = \pm(0.3 + 0.03|A_x|), \text{ дБ} \quad (5.77)$$

$$\Delta \varphi_{Ax} = \pm(5 + 0.1|A_x|), \text{ градусов;} \quad (5.78)$$

$$\delta K_{CTU} = \pm 3 K_{CTU}, \% \quad (5.79)$$

$$\Delta \varphi_{Гx} = \pm(2 + 10/K_{CTU}), \text{ градусов,} \quad (5.80)$$

где A_x – коэффициент передачи,
 K_{CTU} – КСВН.

Векторный Анализатор Цепей VNA 25-37 разработан и изготовлен по оригинальной схеме и обеспечивает такие же и в некоторых случаях лучшие метрологические характеристики.

Во всех трех анализаторах для контроля, управления и отображения измерительной информации используются персональные компьютеры IBM PC, что позволяет обеспечить полный контроль функционирования измерительной системы, применить математический аппарат обработки результатов, тестирование и расширить метрологические и пользовательские возможности оборудования (обработка и сохранение результатов измерений).

В диапазоне частот 1,5 ГГц – 18 ГГц в качестве излучателя и приемника использовались рупорные антенны. Калибровка измерительной системы и измерение S-параметров материалов проводились по двум методикам:

1. Проводился полный цикл калибровочных операций измерительного тракта без рупоров: использовались короткозамыкающая пластина (КЗ),

согласованная нагрузка (СН), две фазовые меры L1 и L2, комбинации КЗ + L1, КЗ + L2, СН + L1, СН + L2, калибровка на проход и калибровка с учетом изоляции портов измерительного тракта. Далее измерялись характеристики рупоров, расположенных раскрытыми друг к другу с небольшим зазором (порядка 3-5 мм); характеристики рупорных антенн сохранялись в памяти и все следующие измерения S-параметров композитных материалов проводились относительно этих характеристик. Материалы помещались в зазор между раскрытыми антеннами.

2. Второй метод предполагает проведение операций калибровки с уже установленными рупорами. Использовалась упрощенная калибровка: СН, КЗ (полированный лист металла), калибровка на проход, калибровка на проход с изоляцией и режим холостого хода (XX) с коэффициентами $dL=0.5-1.4$. Материал помещался в зазор между рупорами и проводились измерения его S-параметров.

По результатам измерений первый и второй методы дают практически одинаковые результаты для узкой полосы измерений $\Delta F \leq 2$ ГГц.

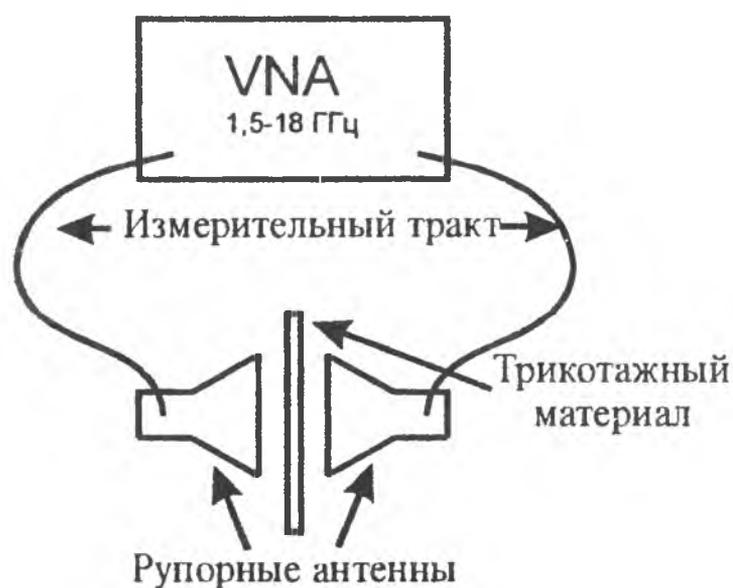


Рис. 5.12. Схема измерения S-параметров трикотажных материалов

В диапазонах частот 17 ГГц – 26 ГГц и 25 ГГц – 37 ГГц в качестве измерительного тракта используется волноводный тракт, в отличие от коаксиального тракта в VNA 1,5-18. Калибровка измерительного тракта и измерения S-параметров композитных материалов проводились стандартным образом. Калибровка включает в себя операции измерения параметров тракта при КЗ, СН, $\lambda/4$ -трансформаторе + КЗ, трех положениях фазовращателей в измерительном тракте и калибровка на проход. Материалы помещались в зазор между фланцами волноводов измерительного тракта.

Конструкция векторного анализатора цепей VNA 17-25 обеспечивает проведение автокалибровочных операций для всего измерительного тракта за счет введения в тракт трех волноводных переключателей и фазовращателей.

В отличие от VNA 17-25, VNA 1,5-18 и VNA 25-37 позволяют проводить одновременно измерения проходных и отражательных S-параметров.

6. ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННО-ВЯЗАНЫХ ПОЛОТЕН (ТРИКОТАЖА) ДЛЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ*

6.1. Конструкции экранов

6.1.1. Обоснование применения трикотажной технологии

Гибкое полотно из волокнистых материалов, используемое в конструкциях радиопоглощающих экранов, может быть изготовлено несколькими способами: в виде ткани, трикотажа, плетеного или нетканого материала и др. Ткацкое и трикотажное производства в качестве сырья для изготовления полотен используют пряжу и различные типы нитей. Нетканые материалы получают из натуральных или химических волокон вязально-прошивным, иглопробивным, вязально-войлочным и клеевым методом. При подготовке пряжи волокнистые материалы проходят технологические операции рыхления, трепания, кордочесания, гребнечесания, прядения и кручения, в результате которых формируют пряжу повышенной ровноты и прочности, требуемого волокнистого состава, обладающую определенными физико-механическими свойствами [324].

Полотна, полученные каждым из перечисленных способов, характеризуются внутренним строением, которое различается по взаимному расположению составляющих полотно волокон или нитей. Для создания эластичных конструкций экранов ЭМИ наиболее предпочтительным является использование трикотажных полотен, так как производительность трикотажных станков значительно выше производительности ткацкого оборудования, а трудоемкость изготовления трикотажа на 21-28% меньше трудоемкости изготовления тканей. Основным преимуществом трикотажа является большая экономия сырья и неприхотливость оборудования к качеству используемых нитей, а также высокая эластичность полотен (рис. 6.1) [325]. Кроме того, трикотажное оборудование позволяет реализовать большее количество видов переплетений по сравнению с ткацким и, следовательно, получать полотна с более сложной и разнообразной структурой.

Трикотажем называются изделия или полотна, образованные соединением петель, полученных из нитей. Трикотажные петли представляют собой изогнутые участки нити, замкнутые дугами других участков. Вид переплетения трикотажа определяется формой, размерами, расположением петель и связями между ними. Нить, образующая петлю, находится в силовом взаимодействии с соседними петлями, благодаря чему сохраняются определенные размеры и форма петель. Основные параметры петли, определяющие физико-механические свойства трикотажа, – длина нити в петле, толщина нити и ее волокнистый состав.

Петли, располагающиеся в трикотаже по горизонтали, образуют петельный ряд, а петли, располагающиеся по вертикали, образуют петельный столбик.

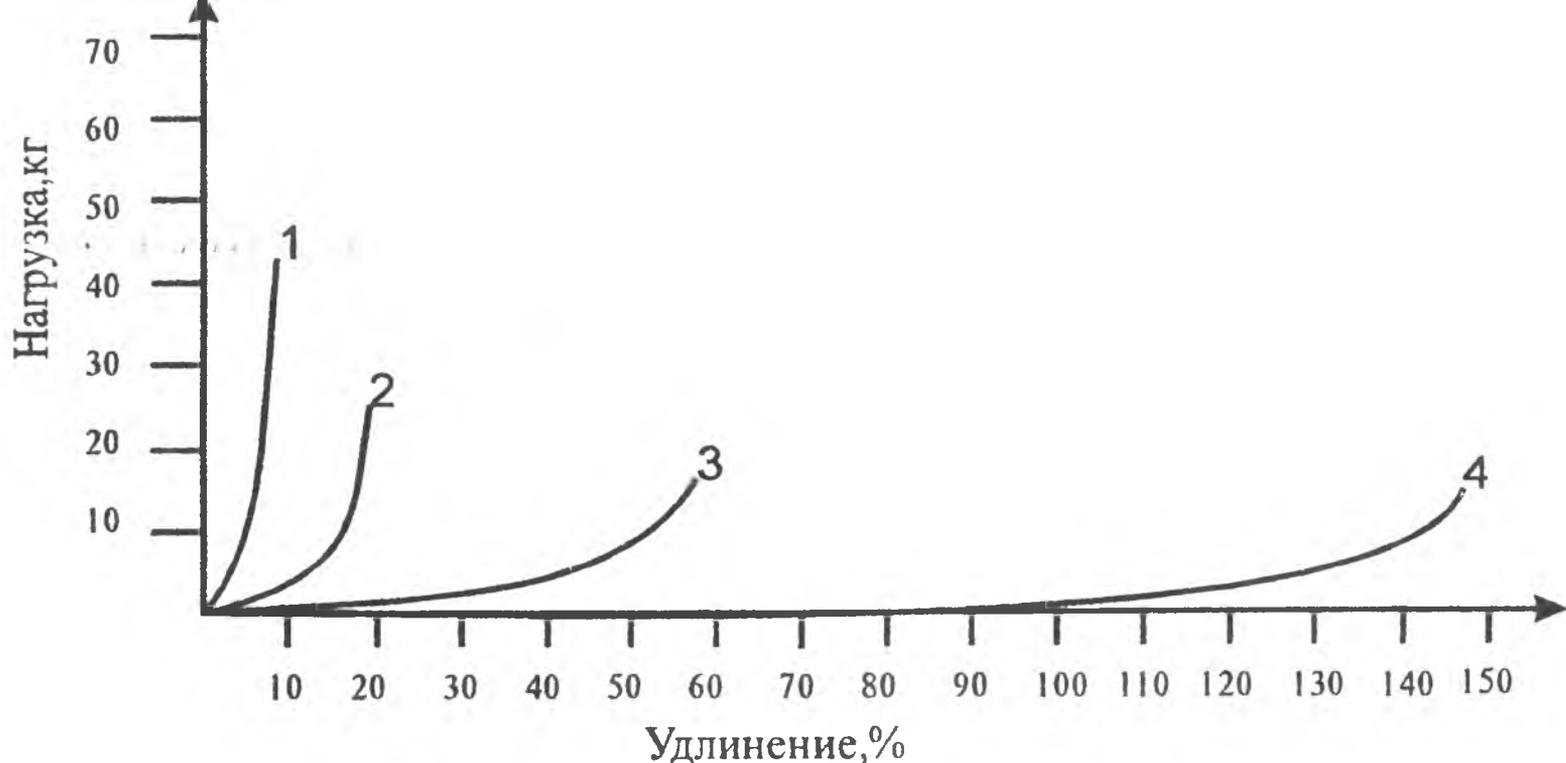


Рис. 6.1. Диаграмма растяжения хлопчатобумажных трикотажа и ткани:
 1 — ткани по длине, 2 — ткани по ширине, 3 — трикотажа по длине, 4 — трикотажа по ширине

Трикотаж по способу образования подразделяют на кулирный, или поперечно-вязаный, и основовязаный, или продольно-вязаный. Поперечно-вязаным называют такой трикотаж, в котором каждая нить последовательно образует все петли петельного ряда. Поэтому для образования ряда поперечно-вязаного трикотажа требуется всего одна нить. В основовязаном трикотаже каждый ряд вяжется из многих нитей путем одновременного изгиба каждой из них в одну петлю. Петли, образующие трикотаж, по форме могут быть открытыми, в которых соединяющие соседние петли протяжки не пересекаются друг с другом, и закрытыми, в которых протяжки пересекаются. Каждая нить в трикотажном полотне представляет собой сложную пространственную кривую, поэтому существует несколько способов отображения структуры трикотажа. Наиболее упрощенным представлением является график переплетения, схематически отражающий траекторию движения нитевода вязальной машины. При графической записи переплетения петли и протяжки изображаются упрощенно: протяжки в виде прямых отрезков, а петли в виде закрытых или открытых дуг.

Структура трикотажа зависит от вида волокнистого материала, структуры и толщины нитей, образующих его, способа переплетения петель друг с другом, длины и модуля петли, плотности вязания и характера отделочных операций [326].

Вид волокнистого материала, структура и толщина нитей, из которых изготовлено трикотажное полотно, определяют его прочность, упругость, устойчивость к истиранию, воздухопроницаемость и теплозащитные свойства, а также толщину и мягкость.

6.1.2. Характеристика переплетений трикотажа

Вид переплетения является одним из наиболее существенных факторов, характеризующих структуру трикотажа и его свойства. От вида переплетения зависит прочность, растяжимость, упругость, толщина, вес и ряд других механических и физических его свойств. Кроме того, вид переплетения оказывает существенное влияние на прочность трикотажа к истиранию.

Плотность трикотажа определяет его вес и толщину. С повышением плотности уменьшается воздухопроницаемость полотна и увеличиваются теплозащитные свойства, прочность и устойчивость к многократным растяжениям и к истиранию.

Трикотажные переплетения подразделяются в соответствии с классификацией А.С. Далидовича на главные, производные, рисунчатые и комбинированные [327].

Главные переплетения.

В группу главных входят простейшие переплетения, образующие трикотажные полотна с равномерной поверхностью.

Гладь представляет собой одинарное поперечно-вязаное переплетение (рис. 6.2). Оно легко распускается как в направлении вязания, так и в направлении, обратном вязанию, а также вдоль петельных столбиков при обрыве нити в петле. Кроме того, гладь закручивается по краям срезов и по кромкам при раскрое.

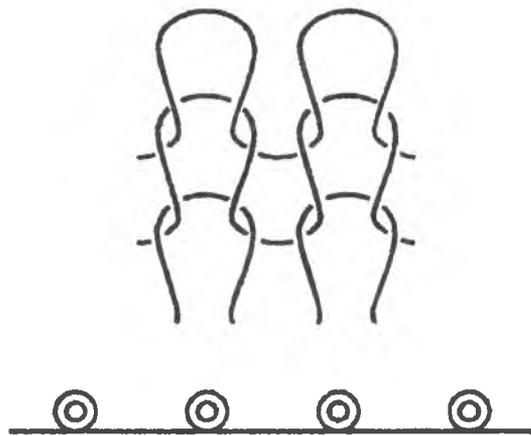


Рис. 6.2. Строение и график глади

Ластик — двойное поперечно-вязаное переплетение, в котором лицевые столбики глади чередуются с изнаночными и на лицевой, и на изнаночной сторонах полотна (рис. 6.3). Ластик с обеих сторон имеет одинаковое строение — лицевое. По сравнению с гладью ластик обладает меньшей распускаемостью и не закручивается.

Изнаночный трикотаж (рис. 6.4) напоминает по своему строению изнанку глади благодаря тому, что ряды петельных дуг выходят то на одну, то на другую сторону полотна. Характерной особенностью этого вида переплетения является одинаковая растяжимость по длине и по ширине.

Из основовязанных переплетений простейшим переплетением является цепочка, характеризующееся тем, что одна нить последовательно образует все петли

петельного ряда. В более сложных основовязаных переплетениях, таких, как трико (рис. 6.5) и атлас (рис. 6.6), нить образует петли в двух или более соседних рядах соответственно. К недостаткам таких переплетений можно отнести распускаемость по направлению петельного столбика и закручиваемость по краям при раскрое.

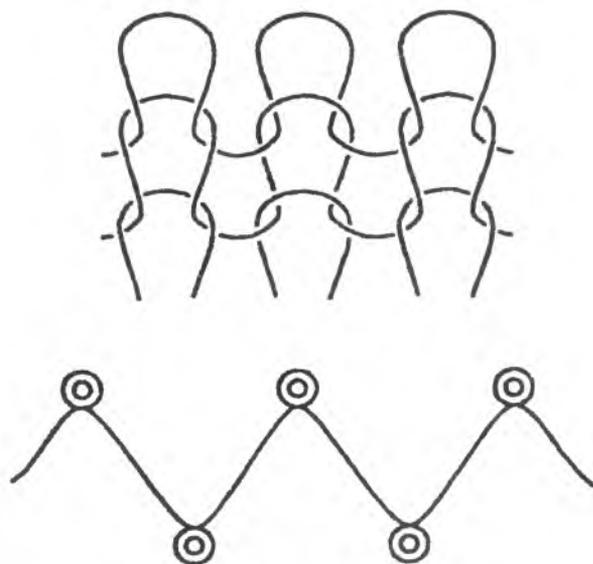


Рис. 6.3. Строение и график ластика

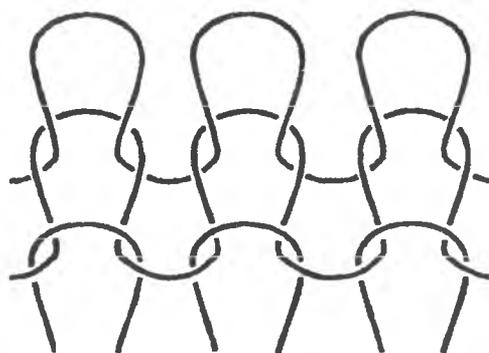


Рис. 6.4. Строение изнаночного трикотажа

Производные переплетения.

Производными называются переплетения, образованные комбинированием двух, трех и более одинаковых главных переплетений, при котором между двумя соседними петельными столбиками одного переплетения размещаются один или два петельных столбика такого же переплетения. В результате образуются переплетения, имеющие структуру, отличную от главных, и обладающие новыми свойствами. Например, производные переплетения благодаря чередованию петельных столбиков, образованных разными нитями. Обладают меньшей распускаемостью при обрыве нити в петле, меньшей растяжимостью и большей прочностью при растяжении по ширине чем те переплетения, на основе которых они получены.

Производная гладь представляет собой сочетание двух переплетений глади (рис. 6.7). Каждый петельный ряд производной глади образуется с помощью двух нитей, каждая из которых формирует самостоятельный ряд глади. Производная гладь распускается только в направлении, обратном вязанию, обладает вдвое большей прочностью по ширине и меньшей растяжимостью по сравнению с гладью.

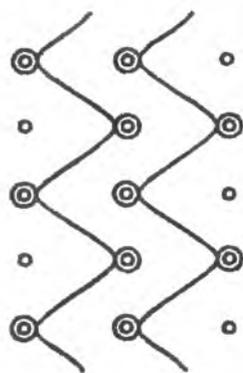
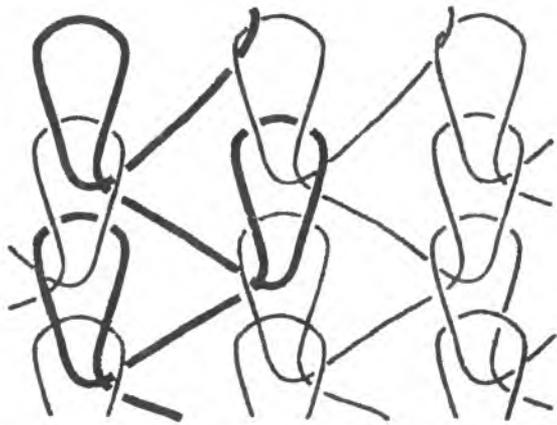


Рис. 6.5. Структура и график трико с закрытыми петлями

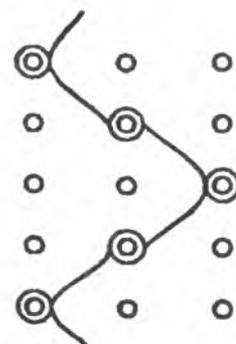


Рис. 6.6. График атласа

Двуластик (интерлочный трикотаж) — двойное переплетение, образованное таким сочетанием двух ластиков, при котором между растянутыми петельными столбиками одного ластика помещаются петельные столбики другого (рис. 6.8). В результате каждый петельный ряд двуластика образуется двумя нитями. Двуластик обладает большей прочностью и упругостью и меньшей распускаемостью и удлинением при растяжении, чем ластик.

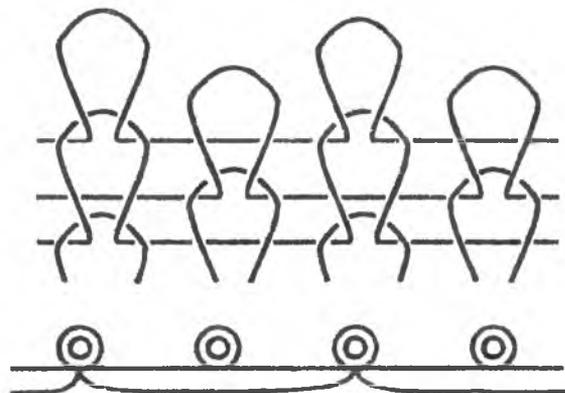


Рис. 6.7. Структура и график производной глади

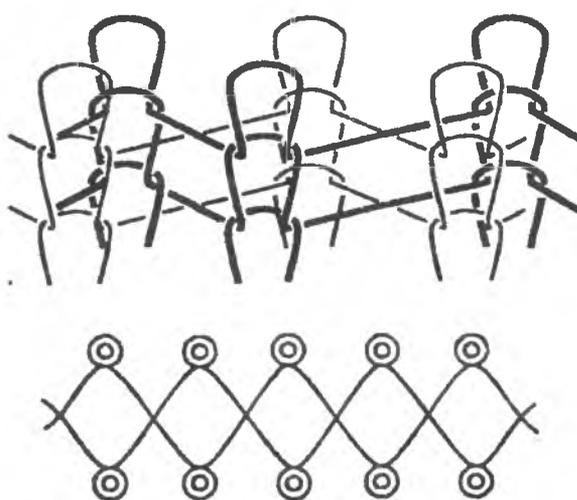


Рис. 6.8. Структура и график двуластика

Из производных переплетений основовязаного трикотажа можно выделить производные трико - сукно и шарме, представляющие собой сочетания двух и трех трико, производные атласы и производные двойных ластичных переплетений. Эти

переплетения обладают меньшей распускаемостью и растяжимостью по сравнению с основными переплетениями, но закручиваются по линиям разрезов.

Выделяют малорастяжимые основовязанные переплетения на основе переплетений цепочка-сукно и цепочка-шарме. Недостатком этих переплетений является их повышенная сминаемость и пониженная прочность. Этими недостатками не обладают кулирные переплетения с пониженной растяжимостью, полученные сочетанием неполного ластика и производной глади (пике). Такие полотна отличаются вдвое меньшей растяжимостью по ширине чем ластик и обладают высокой упругостью.

Рисунчатые переплетения.

Рисунчатые переплетения вырабатываются на основе главных и производных переплетений путем изменения их структуры или ввязывания дополнительных нитей для получения узорных эффектов, а также для придания трикотажу дополнительных свойств.

Поперечно соединенные переплетения - это переплетения, в которых группами чередуются петельные ряды, образованные из нитей разных по цвету, толщине или роду волокна. Их получают на базе кулирных переплетений, периодически сменяя нити. Продольно соединенные переплетения отличаются тем, что петельные столбики в них группами связаны из различных нитей. Для соединения полос образуется один или два петельных столбика, провязанных одновременно нитями из соединяемых участков.

Платированный трикотаж бывает кулирным и основовязанным и образуется прокладыванием на каждую иглу вязальной машины сразу двух или более нитей. Для вязания поперечно-вязаного платированного трикотажа используются нити разного волокнистого состава, а для основовязаного — одинакового. Следует отметить, что платированный основовязанный трикотаж трико-трико позволяет получать полотна с большой пространственной густотой. Плюшевые переплетения представляют собой разновидность платированных переплетений, отличающиеся большей длиной протяжек у изнаночных петель.

В футерованном трикотаже дополнительно прокладываются футерные нити в каждом петельном ряду через некоторое количество столбиков. Неполный трикотаж позволяет реализовать конструкции с рисунчатым эффектом вдоль петельного столбика. Филейный трикотаж имеет сквозные отверстия в виде ячеек. Ячейки эти могут быть разных размеров и форм и располагаться на различном расстоянии друг от друга, благодаря чему можно получать большое разнообразие переплетений, однако эти переплетения легко деформируются в процессе эксплуатации.

При производстве уточного трикотажа (рис. 6.9) кроме нитей грунта прокладываются дополнительные уточные нити, не образующие петель и располагающиеся между остовами петель и протяжками в одинарных переплетениях и между лицевыми и изнаночными петлями в двойных. Такой трикотаж позволяет

формировать рисунок, наложенный на поверхность полотна или скрытый в его объеме.

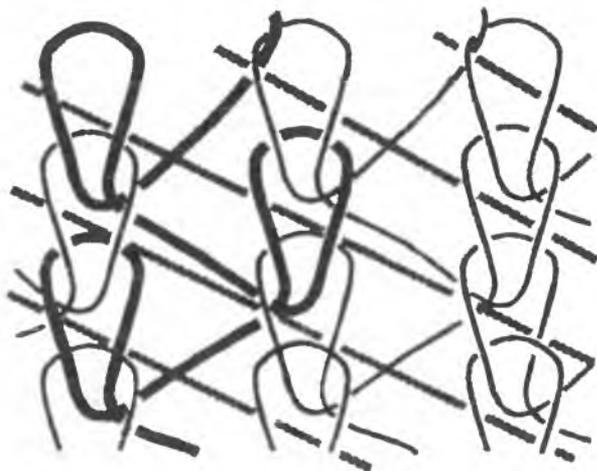


Рис. 6.9. Строение уточного трикотажа

Ажурные переплетения — это переплетения с отверстиями, образованные переносом петель из одних петельных столбиков на другие. Переноса петли в разных направлениях с одной или двух смежных игл, в одном или нескольких подряд рядах можно создавать отверстия разных очертаний и, сочетая их в определенном порядке, получать ажурные рисунки.

Жаккардовые переплетения — это переплетения, образованные из нескольких нитей так, что петли каждой из них располагаются через определенные интервалы, а в тех местах, где нить не образует петли, старая петля не сбрасывается. Наибольшее распространение получили кулирные жаккардовые переплетения, имеющие регулярную (все лицевые петли одинаковых размеров и каждый ряд петель образован из нитей всех используемых типов) и нерегулярную (лицевые петли разных размеров и ряды вяжутся разным количеством нитей) структуру.

При образовании прессового трикотажа нить на иглы вязальной машины прокладывается всегда, но сбрасывается в зависимости от рисунка. Основные виды таких переплетений - фанг и полуфанг - обладают большим весом.

Комбинированные переплетения.

Комбинированные переплетения сочетают в себе признаки главных, производных или рисунчатых переплетений. В зависимости от сочетания переплетений различных классов можно выделить трикотаж простых комбинированных, производно-комбинированных, рисунчатых и сложных комбинированных переплетений. Может быть создано практически неограниченное количество различных комбинированных переплетений, благодаря чему появляется возможность формировать трикотажные полотна с многослойной объемной структурой, достигающей в толщину до 90 мм [328].

Для формирования эластичного электромагнитного экрана с двухслойной структурой можно использовать переплетение, график которого представлен на рис. 6.10. Оно представляет собой две глади, сложенные изнаночными сторонами и соединенные набросками. Обе стороны могут быть связаны из нитей различного

волокнистого состава, цвета и толщины и распускаются по отдельности в случае необходимости.

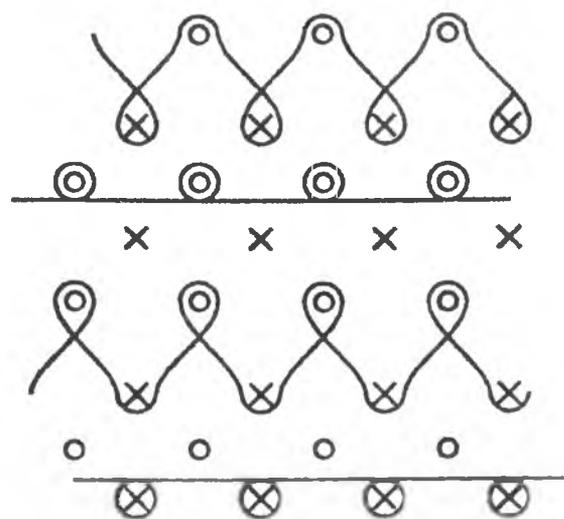


Рис. 6.10. График комбинированного переплетения

Для изготовления трикотажных экранов ЭМИ со стабилизированной петельной структурой наиболее перспективными являются переплетения с малой растяжимостью, высокой износостойкостью и воздухопроницаемостью. Кроме того, для исключения разброса физических характеристик полотна по плоскости необходимо получать материалы с наименьшим колебанием геометрических параметров элементарных ячеек. С этой точки зрения необходимо использовать производные двойные переплетения, обладающие пониженной растяжимостью и распускаемостью, такие, как двуластик, и производные виды переплетений: атлас, сукно и шарме.

При необходимости создания распределенных структур с упорядоченным строением по плоскости трикотажного полотна удобно использовать рисунчатые переплетения, позволяющие реализовать различные пространственные конфигурации нитей. Особый интерес представляет уточное переплетение, в котором на каркас из главного или производного переплетения накладывается требуемый рисунок уточной нити.

Наиболее перспективными являются комбинированные переплетения, каждое из которых должно разрабатываться с учетом особенностей структуры радиопоглощающего экрана. Они позволяют создавать упорядоченное распределение волокнистого материала, как в плоскости полотна, так и по его объему.

6.1.3. Геометрические параметры структуры трикотажа

Свойства трикотажных полотен так же, как и свойства других текстильных материалов, подразделяются на геометрические (толщина, ширина, длина); механические – прочность на разрыв при растяжении, деформация растяжения и ее составные части, деформация изгиба (сминаемость, закручиваемость), тангенциальное сопротивление (распускаемость, сопротивление проколу иглой) и

т.д.; физические – проницаемость, теплозащитные, оптические; износостойкость – способность материала противостоять совокупному действию истирания, многократных растяжений и т.д.

Основными геометрическими параметрами строения трикотажа являются плотность по вертикали и горизонтали, длина петли, модуль петли, а также заполненность трикотажа волокнистым материалом.

Одним из основных параметров, характеризующих материал, из которого изготавливается трикотажное полотно, является толщина нити и пряжи, измеряемой в тексах. В системе ТЕКС толщина нитей определяется величиной массы (веса, г), приходящейся на единицу длины:

$$T = \frac{g}{L_0}, \quad (6.1)$$

где g – масса нити, г,

L_0 – длина нити, км.

Размерность текса – г/км. величиной, обратной тексу, является тонина нитей, обозначаемая номером N . Номер показывает длину нити в единице веса (количество метров в грамме или километров в килограмме) и определяется по формуле:

$$N = \frac{L}{g}, \quad (6.2)$$

где L – длина нити, м.

При скручивании нитей номинальную расчетную толщину или номер определяют по формулам:

для нитей одинаковой толщины

$$T_p = T_0 n, \quad (6.3)$$

где T_p – номинально-расчетная толщина нити, текс;

T_0 – номинальная толщина одиночной нити, текс;

n – число скручиваемых нитей

или

$$N_p = \frac{N_0}{n}, \quad (6.4)$$

где N_p – номинально-расчетный номер;

N_0 – номинальный номер одиночной нити;

для нитей различной толщины

$$T_P = T_1 + T_2, \quad (6.5)$$

где T_1 и T_2 – толщина первой и второй нитей,

или

$$N_P = \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2}. \quad (6.6)$$

где N_1, N_2 – номер первой и второй нитей.

Для трикотажных полотен различают плотности по горизонтали P_H и вертикали P_V , которые характеризуются количеством петельных столбиков (петельных шагов) или петельных рядов, приходящихся на отрезок длины 50 мм соответственно.

Заполненность трикотажа волокнистым материалом характеризуется поверхностным и объемным заполнением и рассчитывается по формулам:

$$E_S = \frac{d_P l_{\Pi} \cdot 100}{AB}, \quad (6.7)$$

где E_S – поверхностное заполнение трикотажа, %;

d_P – диаметр нити, мкм;

l_{Π} – длина петли, мм;

A – ширина петельного столбика, мм;

B – высота петельного ряда, мм (рис. 6.11);

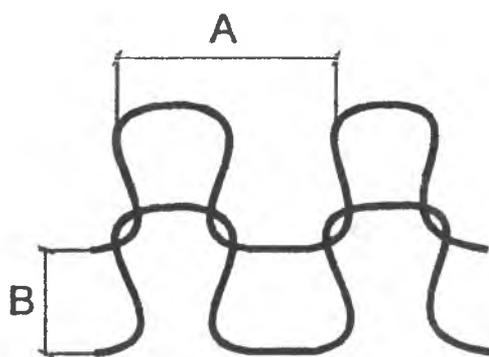


Рис. 6.11. Геометрические параметры строения трикотажа

$$E_V = \frac{\pi d_P^2 l_{\Pi} \cdot 100}{4bAB}, \quad (6.8)$$

где E_V – объемное заполнение трикотажа, %;

b – толщина трикотажа, мм.

Форма петли оценивается по параметру R – расстояние между петельными столбиками. Длина петли зависит от вида переплетения и рассчитывается для каждого вида полотна в отдельности.

6.1.4. Способы формирования упорядоченного строения трикотажа

Условия изготовления и богатый выбор существующих видов переплетений позволяют получать материалы из комплексных текстурированных нитей, дополнительно содержащих упорядоченные структуры из микропровода, которые различаются по способу переплетения, материалу провода и виду рисунка. В первую очередь строение трикотажного полотна определяется видом переплетения и классом машины (соответствует количеству игл в игольнице на единицу длины: английский или саксонский дюйм), на котором оно произведено [329].

В процессе вязания трикотажа используются натуральные (хлопок, лен, шерсть), искусственные (вискоза), синтетические (полиамидные, полиэфирные, полиакрилонитрильные и др.) волокна, а также металлические нити, применение которых позволяет осуществлять распределение проводящего материала в объеме полотна.

Одним из способов создания пространственной конфигурации микропровода является прокладывание его вместо одной или нескольких нитей, заправленных в нитеводы трикотажной вязальной машины. При вязании на кулирных машинах металл будет распределен вдоль петельного ряда, а на основовязаных – вдоль петельного столбика. Таким способом может быть изготовлен полностью металлический трикотаж. В случае использования рисунчатых переплетений может быть сформирована конструкция, содержащая щели или уплотнения определенной формы и распределения. Однако технология вязания трикотажного полотна из металлической нити обладает повышенной материалоемкостью, а сами полотна теряют эластичность и износостойкость, поэтому ее сложно использовать в конструкциях с часто изменяющейся формой.

При формировании рисунка из металлической нити или микропровода путем провязывания их совместно с ассистирующей нитью (рис. 6.12) из несущего органического материала износостойкость и гибкость трикотажных полотен значительно увеличиваются.

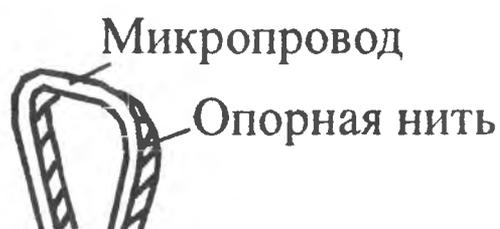
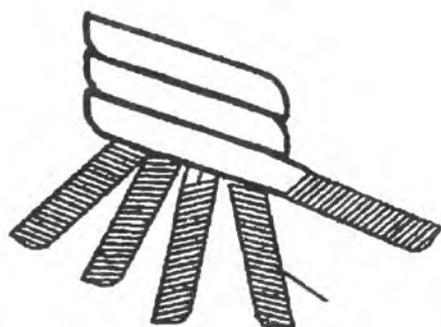


Рис. 6.12. Петля из микропровода с несущей нитью

Комплексная пряжа, из которой вяжется полотно, металлизирована путем смеси натуральных или химических волокон с металлическими волокнами в

процессе прядения или кручения при изготовлении трикотажного сырья. В частности, при скручивании нескольких нитей, одна или несколько из них являются металлическими или металлизированными физическими, химическими, электрохимическими и др. способами (рис. 6.13). Для изменения электрофизических свойств материалов может быть осуществлена металлизация не только отдельно самих нитей, но и готового полотна в целом.



Металлическая нить

Рис. 6.13. Получение крученой пряжи введением металлической нити

Формирование рисунка на трикотажном полотне, кроме использования рисунчатых переплетений, также осуществляется по технологии печати с применением дисперсных металлсодержащих красителей.

6.1.5. Способы формирования геометрических неоднородностей на поверхности машинно-вязаных полотен

6.1.5.1. Методы получения рельефных машинно-вязаных основ

Существующие технологии создания экранов (поглотителей) ЭМИ в основном ориентированы на поглотители гладкой формы, возникает проблема разработки технологии необходимой для создания поглотителей с геометрическими неоднородностями в едином технологическом цикле.

Полотно из волокнистых материалов, используемое в конструкции радиопоглощающих экранов, может быть изготовлено несколькими способами: в виде ткани, трикотажа, плетеного и нетканого материала [330].

Для создания эластичных конструкций экранов ЭМИ наиболее предпочтительным является использование машинно-вязаных (трикотажных) полотен. Вид переплетения трикотажа определяется формой, размерами, расположением петель и связями между ними, и поэтому представляется одним из наиболее существенных факторов, характеризующих структуру полотен и их свойства [331].

При разработке рельефного машинно-вязаного полотна, применяемого в качестве основы для электромагнитных экранов, особое внимание следует уделить достижению рельефа псевдопирамидальной формы. Наличие пространственно-распределенных неоднородностей на поверхности

машинно-вязаного полотна позволит увеличить эффективность экранирования и расширить его рабочий диапазон частот.

Вырабатывая трикотаж путем различного сочетания элементов структуры могут быть получены разнообразные формы их конструкций, например, рельефные. Одни и те же рельефные формы полотен могут быть достигнуты на базе трикотажа разных классов переплетений: главных, производных, рисунчатых и комбинированных.

Наиболее перспективным представляется чередование на поверхности полотен упорядоченных выпуклостей и впадин. Рельефный рисунок может быть образован благодаря разной толщине нитей. Например, согласно другого метода в результате неравномерного распределения петель по линии петельных столбиков и рядов, из-за чего участки с большим числом петель будут стянуты соседними участками, имеющими меньшее число петель и будут выступать на поверхности трикотажа в виде бугорков различных геометрических размеров и формы.

На основе анализа современных структур машинно-вязаных полотен и способов их получения можно выделить следующие:

1. Получение рельефных форм полотен на базе прессовых переплетений;
2. Получение рельефных форм полотен на базе жаккардовых переплетений;
3. Получение рельефных форм полотен на базе комбинированных переплетений.

Под названием прессового переплетения понимаются полотна, изготовленные согласно технологии, в которой петли грунта и незамкнутые петли (наброски), образованные из тех же нитей, что и петли грунта. Замкнутая петля и набросок составляют прессовую петлю, которая может иметь один или несколько набросков, количество которых определяет индекс данной петли. Набросок может быть образован к одной или к нескольким подряд, расположенными петлями, т.е. быть одно-, двух-, трех- или многоигольным.

По базовому переплетению прессовый трикотаж может быть кулирным и основовязаным, одинарным и двойным.

В зависимости от строения прессовых петель может быть регулярным (все прессовые петли одной стороны имеют одинаковый индекс) и нерегулярным (прессовые петли одной стороны имеют различную структуру, разный индекс или имеет место сочетание прессовых петель и петель базового переплетения).

По рисунчатому эффекту прессовый трикотаж делят на гладкий и рисунчатый (цветной, оттеночный, ажурный, рельефный) [332].

Формирование рельефа обусловлено тем, что прессовые петли большого индекса, расположенные по рисунку среди петель грунта стягивают участки грунтовых петель, образующих бугорки.

Наибольшее распространение получило двойное прессовое переплетение – полуфанг. Двойным полуфангом (рис. 6.14) называют такое прессовое переплетение, у которого все петли одной стороны – одинарные прессовые петли 1, а все петли другой стороны – петли глади 3 и 4. Соединение с набросками 2 петли 4 имеют

округлую форму, прессовые петли 1 вытянуты за счет петель 3, в результате чего на одной стороне переплетения видны удлиненные прессовые петли 1, а на другой – округлые петли 4, создающие ячеистую поверхность.

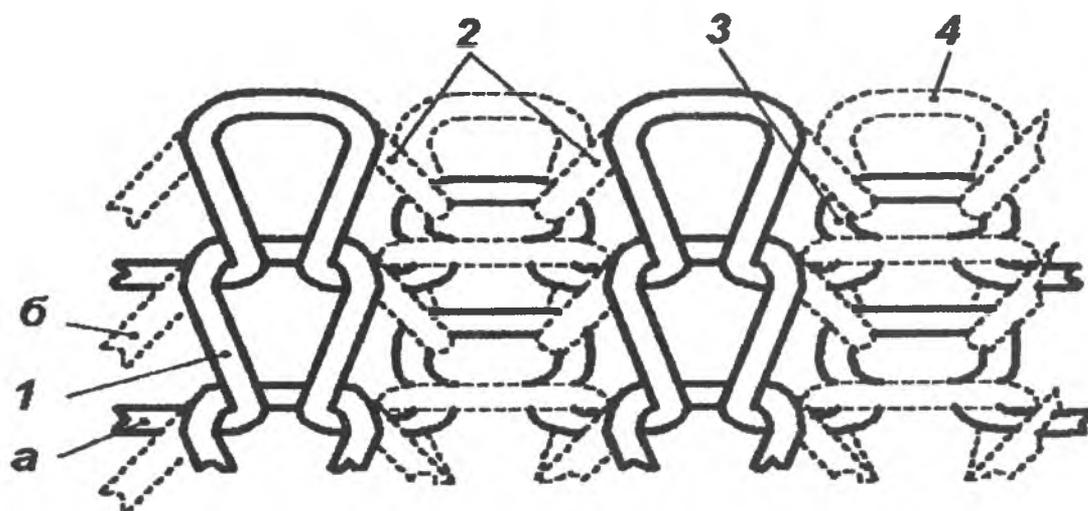


Рис. 6.14. Строение двойного прессового переплетения

Рельефное двойное прессовое переплетение характеризуется тем, что группа петель 3 и 9 (рис. 6.15) глади заключается в прессовые петли 1, 6, 7 и 8, имеющие различное число набросков. Так, петли 1 и 7 имеют по одному наброску 2, петли 6, 8 – по два наброска 4 и 5. Прессовые петли с несколькими набросками не могут увеличиваться и потому стягивают трикотаж по длине; при этом образуется излишек из петель глади 3 и 9, которые выступают из плоскости полотна, создавая неровную, рельефную поверхность.

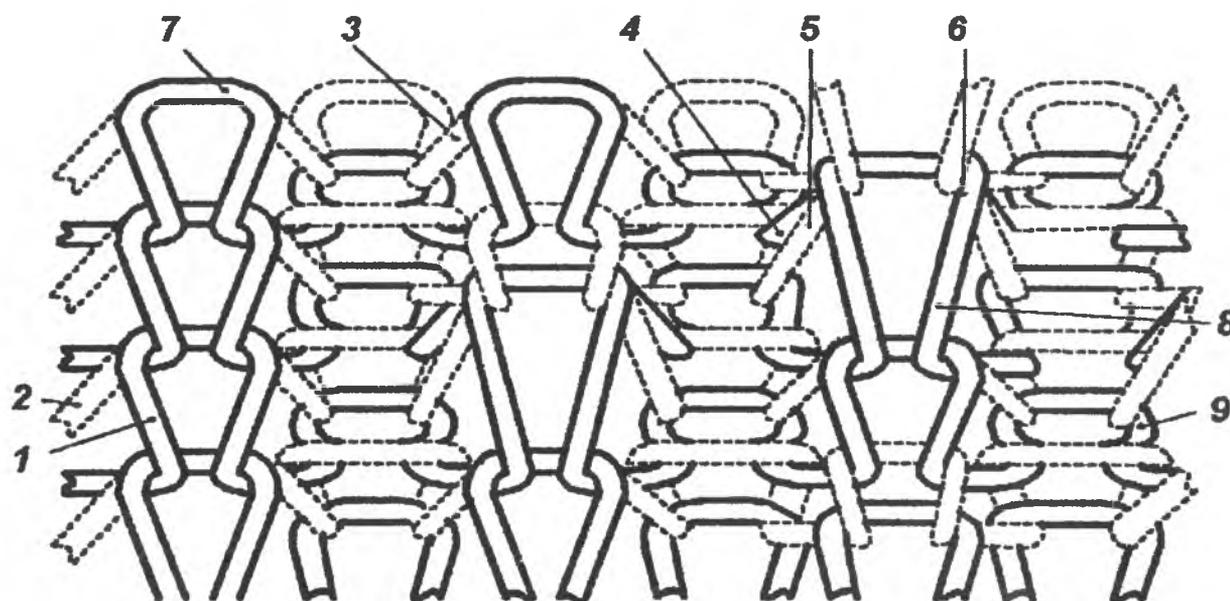


Рис. 6.15. Строение рельефного двойного прессового переплетения

Способы образования набросков различаются в зависимости от конструкции игл и процесса вязания. Достигается это в любом случае изменением или исключением из обычного цикла петлеобразования отдельных его операций.

В результате проведенных нами исследований выявлено, что существуют четыре способа получения набросков в трикотаже прессовых переплетений, два из

петли по рисунку, а в местах, где данная нить не образует петель, она образует протяжки, располагающиеся на изнанке по отношению к жаккардовой петле [335].

По базовому переплетению жаккардовый трикотаж делят на одинарный и двойной, кулирный и основовязанный.

В структуре жаккардового трикотажа могут сочетаться только жаккардовые петли или жаккардовые и петли базового переплетения. Строение жаккардовой петли характеризуется индексом, показывающим, сколько протяжек пересекает остов жаккардовой петли с изнанки. По строению жаккардовых петель кулирный жаккардовый трикотаж делят на регулярный (все жаккардовые петли имеют одинаковый индекс) и нерегулярный (жаккардовые петли имеют разный индекс).

По рисунчатому эффекту кулирный жаккардовый трикотаж делят на цветной, оттеночный и рельефный. Рельефные жаккардовые переплетения получают путем образования жаккардовых петель высокого индекса на фоне глади. Жаккардовые петли стягивают петли глади и, окаймляя участки этих петель, создают из них выпуклости. Чем выше плотность вязания и упругость нити, тем рельефнее выпуклости. Рельефный одинарный трикотаж жаккардовых переплетений получается при образовании жаккардовых петель 2 (рис. 6.17) с увеличенными индексами (двойных, тройных и т.д.) на фоне петель 1 глади.

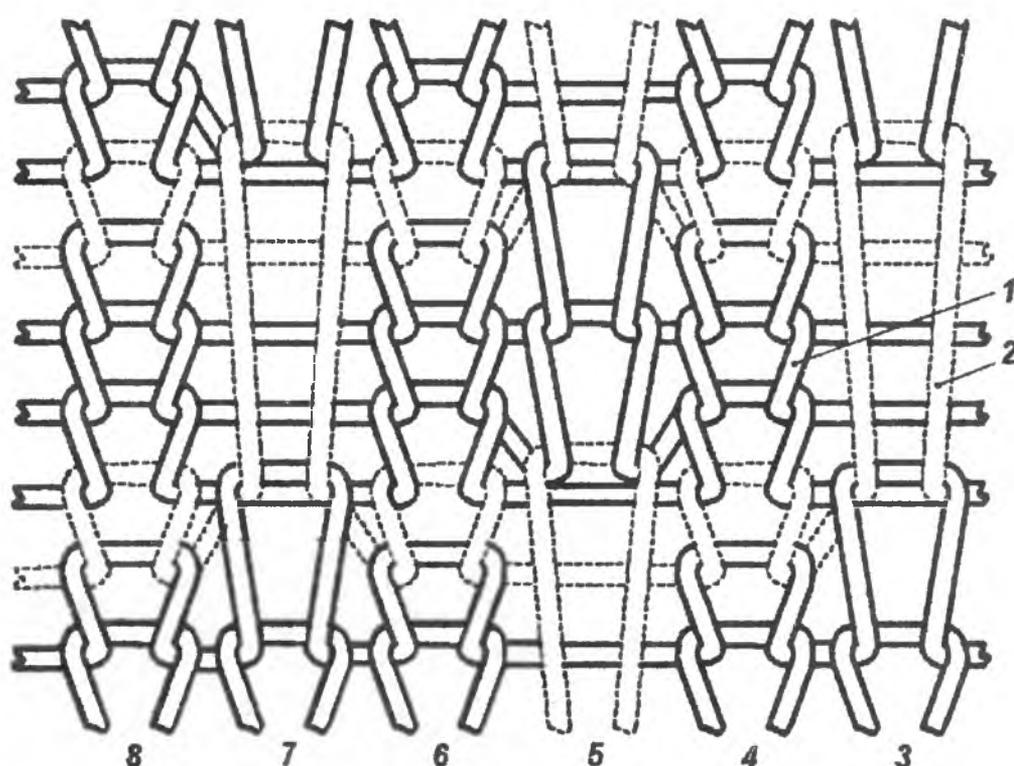


Рис. 6.17. Строение рельефного одинарного трикотажа жаккардовых переплетений

Жаккардовые петли петельных столбиков 3, 5, 7 и т.д. не могут вытянуться на 3-4 ряда, поэтому они будут стягивать петельные столбики глади, из которых будут образовываться бугорки. Чем плотнее расположены нити, и чем больше упругое удлинение пряжи, тем рельефнее выпуклые участки.

Нерегулярный двойной трикотаж жаккардовых переплетений может быть цветным, рельефным и накладным. Рельефный нерегулярный трикотаж

жаккардовых переплетений характеризуется наличием на лицевой стороне группы жаккардовых петель с индексами один, два и более. На рис. 6.18 изображено строение такого трикотажа. Двойные жаккардовые петли 1, образованные нитью а, не могут вытянуться на три ряда изнаночных петель 3 и поэтому они стягивают эти петли, лежащие сзади них, а так как петли 1 лицевой стороны не связаны с петлями 3 изнанки, то на изнаночной стороне на фоне петель глади 2 получают валики, расположенные поперек трикотажа.

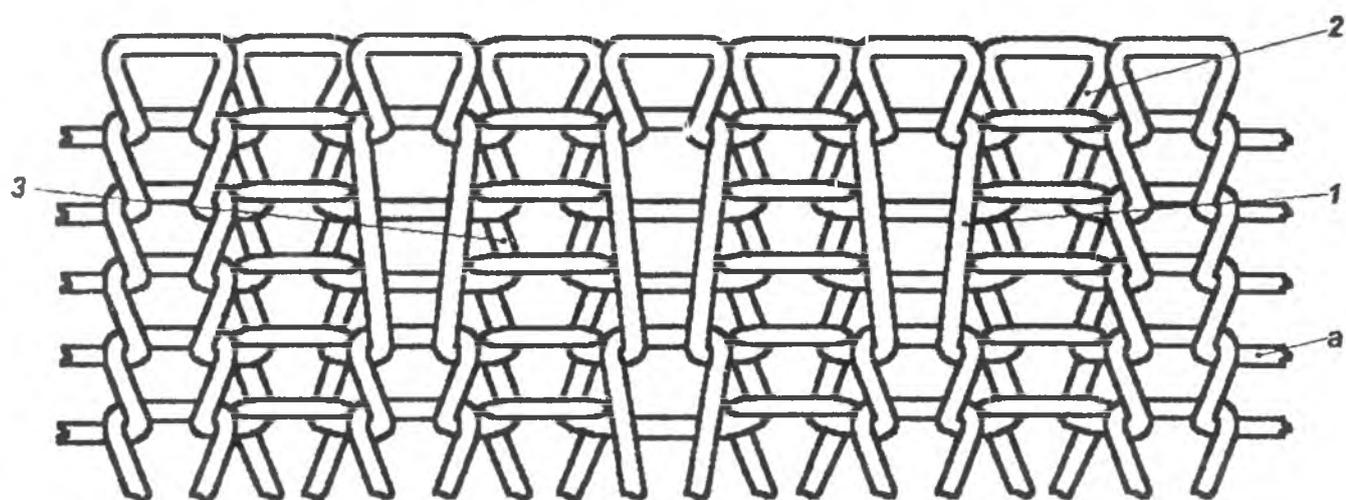


Рис. 6.18. Строение рельефного нерегулярного трикотажа жаккардовых переплетений

При формировании рельефной формы полотен методом жаккардового переплетения одни нити прокладываются на все иглы одной игольницы и выборочно на иглы другой. Другие же нити прокладываются только на некоторые иглы одной игольницы. Чем больше число петель по вертикали на лицевой стороне соответствует одной петле изнанки, тем больше рельефные неравномерности по толщине. Рельеф на трикотаже, полученном по кладке нитей, изображенной на рис. 6.19 б, будет больше, чем на трикотаже, полученном по кладке нитей, изображенной на рис. 6.19 а.

Разработана общая классификация кулирных жаккардовых переплетений, в которую включены также неполные структуры. Анализ и исследование последних позволил выявить возможный потенциал данной структуры.

При отсутствии петельных столбиков возникает некоторая свобода структуры переплетений, создаются условия для проявления упругих свойств нити, в результате чего возникает структурный, рельефный эффект на полотне. Характерной особенностью этих переплетений является то, что рельефные формы создаются сочетанием протяжек. В зависимости от комбинации и длины протяжек возникают различные профили таких форм. При этом формы базового жаккардового переплетения, свойств нити, параметров петельной структуры.

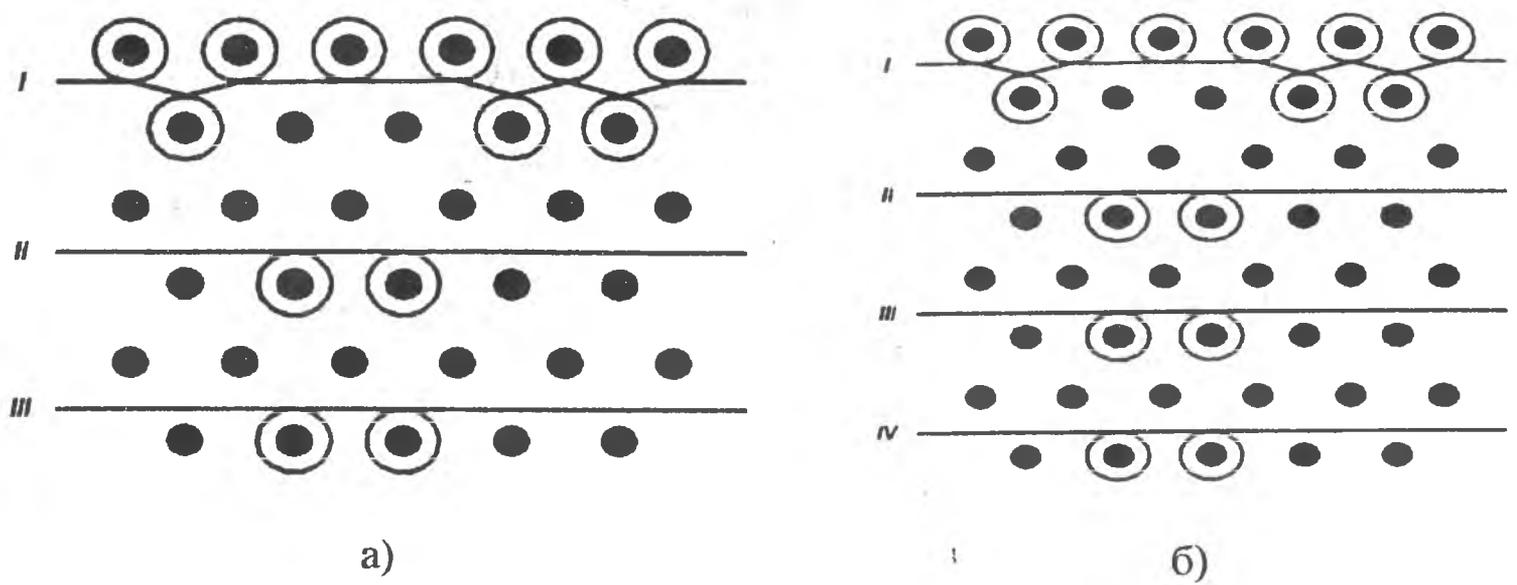


Рис. 6.19. Схема жаккардового накладного переплетения

Условием получения жаккардовой петли является отсутствие нити под крючком иглы и сбрасывание старой петли. Достигается это различными способами в зависимости от конструкции игл. На машинах с язычковыми иглами при их последовательном движении для образования жаккардовой петли достаточно выключить иглу из работы, оставив ее в нижнем положении.

Наиболее перспективным методом создания новых рельефных структур, имеющим большие возможности, является комбинирование переплетений, которое в последнее время стало основным методом создания новых рельефных структур. К трикотажу комбинированных переплетений относятся такие переплетения, которые состоят из совокупности элементов структуры нескольких главных производных и рисунчатых переплетений [336].

Для изучения особенностей строения комбинированных переплетений нами предлагается разделить на три группы:

1. Простые комбинированные переплетения;
2. Комбинированные переплетения, состоящие из простых и рисунчатых;
3. Комбинированные рисунчатые переплетения.

При получении кулирных комбинированных переплетений используются три элемента петельной структуры: петля, набросок и протяжка. Среди кулирных переплетений на базе главных наибольшее распространение получили простые комбинированные переплетения, состоящие из одинарных и главных двойных переплетений.

Ластик с рельефом относится к простым многорядным комбинированным переплетениям. Он вырабатывается несколькими петлеобразующими системами. В зависимости от раппорта вяжется поочередно несколько рядов 6 ластика 1+1 и несколько рядов 4 глади. На рис. 6.20 показано строение пятирядного комбинированного переплетения, в котором последовательно образуются два ряда 5, 6 ластика 1+1 и три ряда 1, 2, 4 глади. При его получении после образования двух рядов 5, 6 ластика иглы одной игольницы выключаются из работы, а иглы другой игольницы вяжут три ряда 1, 2, 4 глади. Затем вновь вяжутся два ряда ластика на

двух игльницах. Изнаночные петли 3 увеличиваются за счет перетягивания нити из лицевых петель ряда 5. После стягивания петель ряда 2 перетягивание нити в петли 3 затрудняется, вследствие чего лицевые петли рядов 1, 2, 4 глади выступают на лицевой стороне, образуя валик вдоль петельных рядов.

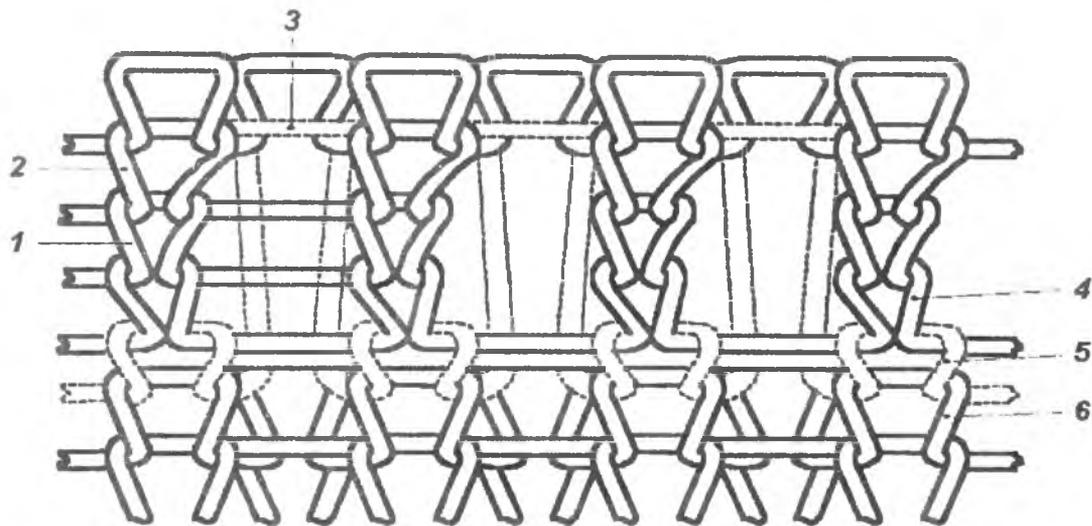


Рис. 6.20. Строение рельефного ластика

Число провязываемых рядов глади зависит от прочности и эластичности нитей (пряжи), из которых вырабатывается трикотаж данного переплетения, т.к. сила оттяжки в основном приходится на петли 3 ластика, которые не сбрасываются с игл на протяжении вязания рядов глади. Кроме этого, необходимо обеспечить оттяжку петель рядов 1, 2, 4 глади от петель 3 через петли 5.

Высота валика зависит от соотношения длины петель глади и ластика, от числа петельных рядов глади в валике. Прерывистые рельефные поперечные валики получают, исключая прокладывание нити на одну или несколько игл (рис. 6.21).

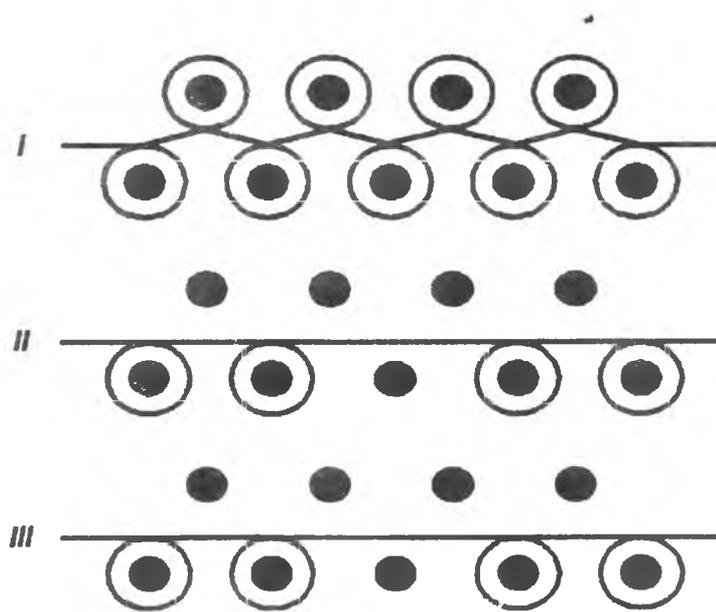


Рис. 6.21. Схема получения прерывистых поперечных рельефных валиков

Широкое распространение получили комбинированные переплетения, сочетающие ряды главных переплетений с рядами рисунчатых прессовых переплетений. Двухслойный кулирный трикотаж прессового соединения

представляет большую перспективу. При его изготовлении можно использовать нити (пряжу), различные по виду, свойствам и т.п., для получения полотна хорошего качества, удовлетворяющего необходимым требованиям.

К трикотажу комбинированных рисунчатых переплетений относятся такие, которые сочетают в одном петельном ряду или раппорте признаки нескольких рисунчатых переплетений. В этих переплетениях встречаются все три элемента петельной структуры: петли, наброски и протяжки. Комбинированные рисунчатые переплетения, в основном, получают теми же способами, что и простые комбинированные переплетения на базе главных, производных с рисунчатыми.

Разработанное букле (рис. 6.22) состоит из четырех рядов, в которых встречаются все три элемента петельной структуры.

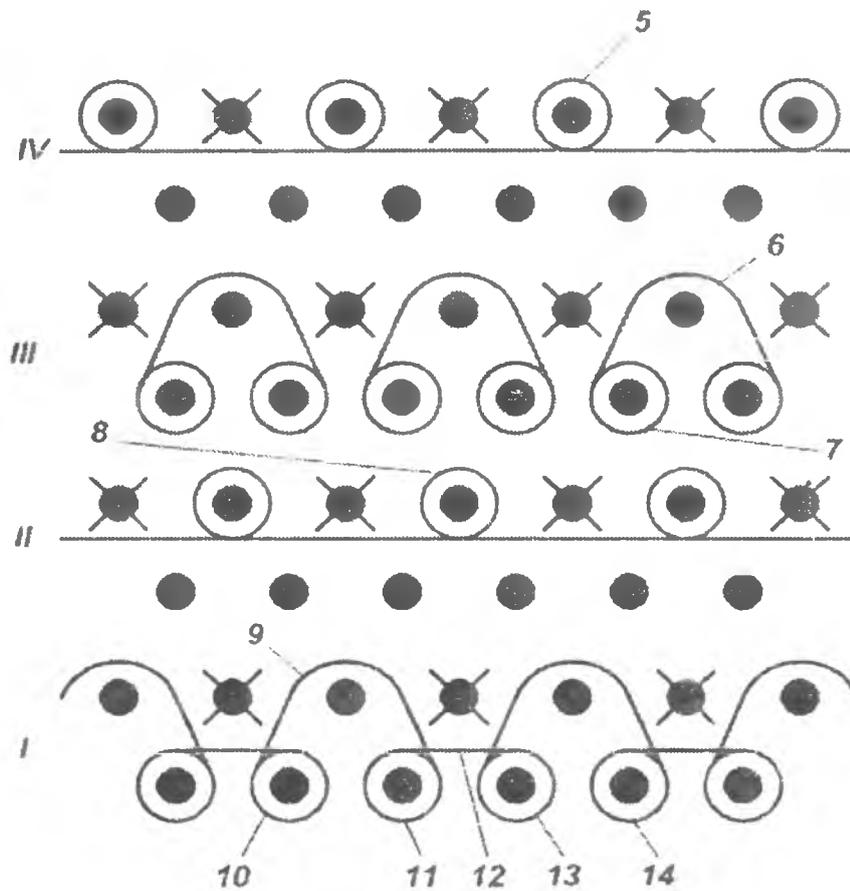


Рис. 6.22. Схема букле нового

Для вязания такого букле необходимо иметь четыре петлеобразующие системы. В системе I петли 10 провязываются всеми иглами одной игольницы: на другой игольнице на четных иглах образуются наброски 9 (ряд 1). В системе II (ряд 2) на четных иглах другой игольницы провязывают петли 8. В системе III вяжется ряд 3; все иглы третьей игольницы провязывают петли 7, а на четных иглах другой игольницы образуются наброски 6. В системе IV вяжется неполная гладь (ряд 4), на нечетных иглах образуются петли 5.

В результате такой последовательности работы игл двух игольниц получается трикотаж, на лицевой стороне которого располагаются петли 5, 8 с набросками 6, 9, расположенными в шахматном порядке. Благодаря шахматному расположению петель с набросками на лицевой стороне трикотажа создается структурный рисунок в виде ромбовидных ячеек.

Комбинированные переплетения применяются с целью уменьшения растяжимости полотна и повышения его формоустойчивости, а путем комбинирования известных классов переплетений позволяет создавать разнообразные рельефные формы на полотне.

6.1.5.2. Рельефные машинно-вязаные основы на базе прессовых переплетений

Для получения образцов полотен рельефной формы использовалось плоскофанговое оборудование ПВК-М 6 класса. Рельефная структура формируется на базе прессовых переплетений, главным элементом структуры которых является прессовая петля – замкнутая петля и набросок.

Машинно-вязаное основание первого предложенного варианта (рис. 6.15.), представляет собой двойное, кулирное, прессовое переплетение – полуфанг. Одна сторона полуфанга состоит из одинарных прессовых петель, имеющих один набросок, а другая сторона – из петель глади. В результате этого на поверхности полотна формируются геометрические неоднородности в виде гофров с высотой 6 мм, шириною основания 4 мм и расстоянием между их центрами 4 мм (рис. 6.23.).

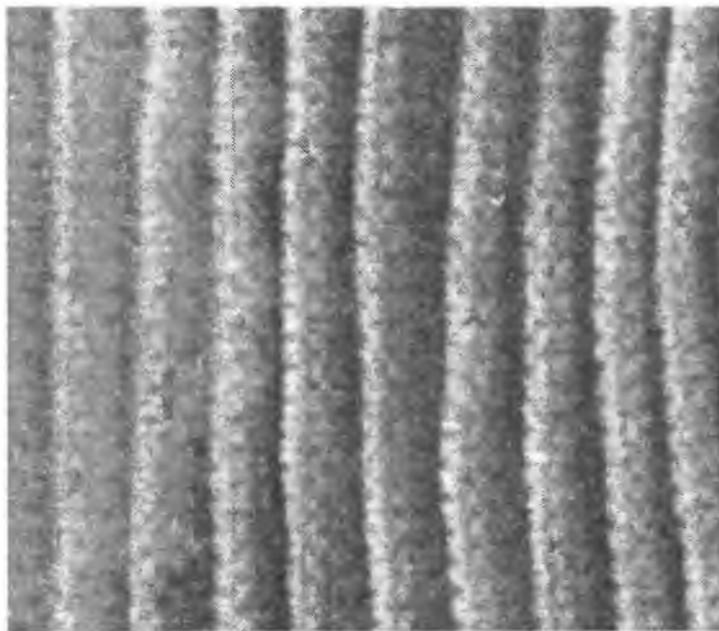


Рис. 6.23. Внешний вид фрагмента поверхности прессового переплетения полуфанг (ПМГП-6-4)

Согласно второму предложенному варианту, выполненный образец также представляет собой кулирное, двойное прессовое переплетение, но в отличие от первого образца прессовая петля имеет два наброска (индекс прессовой петли $I = 2$). Геометрические параметры такого образца отличаются от предыдущего расстоянием между центрами неоднородностей, которые составляют 10 мм. Таким образом, изменение индекса прессовой петли, при одном и том же используемом переплетении, позволяет получать полотна с различным расстоянием между центрами формируемых гофров (рис. 6.24.).

Третий предложенный вариант машинно-вязаного основания, представляет собой рельефный двойной трикотаж на базе неполного ластика (рис. 6.20.) с

элементами прессового переплетения. В этом образце рельефная форма полотна наиболее перспективна с точки зрения разновысотности. Индекс прессовой петли в этом варианте составляет 4 наброска. Поэтому прессовые петли, расположенные среди петель грунта стягивают участки грунтовых петель, образующих рельефные бугорки в виде гофров, высота которых достигает 3 мм при ширине 6 мм и расстоянии между их центрами 4 мм (рис. 6.25.).

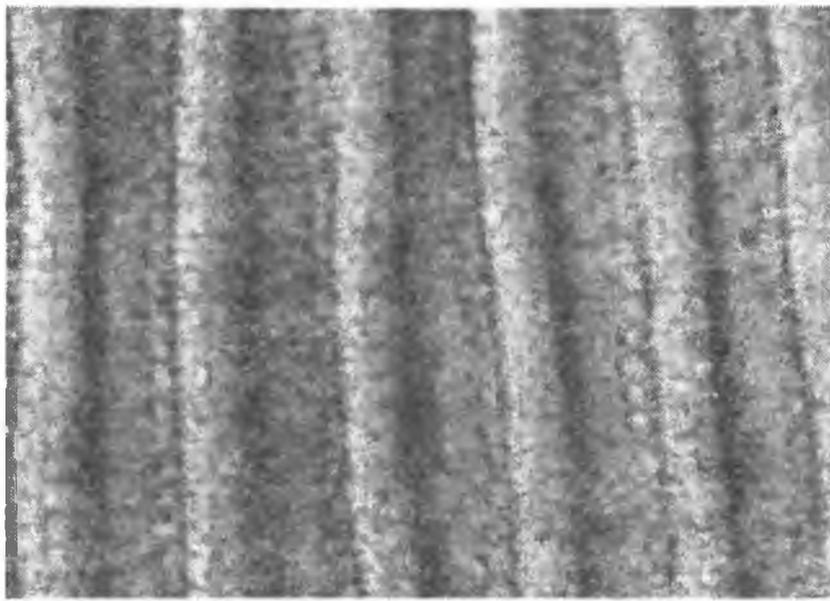


Рис. 6.24. Внешний вид фрагмента поверхности прессового переплетения полуфанг с индексом прессовой петли $I=2$ (ПМГП-6-10)

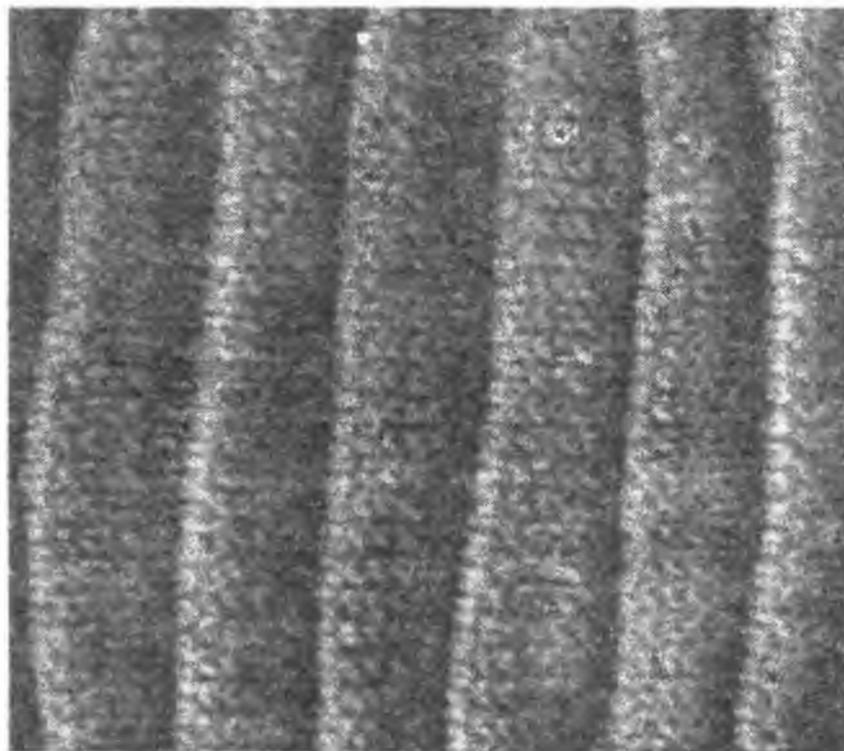


Рис. 6.25. Внешний вид фрагмента поверхности прессового переплетения неполный ластик (ПМГНЛ-3-4)

Заправочные параметры полотна определены согласно ГОСТ [337, 338]. Графические записи образцов представлены в таблице приложения 1, заправка нитей и технологические параметры в табл. 6.1.

6.1.5.3. Рельефные машинно-вязаные основы на базе комбинированных переплетений

Разработка образцов рельефных полотен на базе комбинированных переплетений производилась на плоскофанговом оборудовании ПВК-М 6 класса из двух видов сырья: полиакрилонитрил (ПАН) – 33 текс х 2 и хлопчато-бумажные (х/б) волокна 18,6 текс х 2.

Использование комбинированных переплетений дает большие возможности для создания необходимого рельефа на полотне. Поэтому для создания рельефных машинно-вязаных оснований с неоднородностями псевдопирамидального типа был разработан ряд структур комбинированных переплетений.

Согласно четвертому варианту, предложено сложное комбинированное переплетение, в котором ряды неполного ластика чередуются с рядами полной и неполной глади. При выработке этого образца в заправку были дополнительно введены полиэфирные комплексные высокоусадочные нити линейной плотности 16,8 текс, которые придали ему хорошую формоустойчивую структуру и уменьшили его растяжимость. Этот образец имеет ярко выраженную рельефную форму в виде псевдопирамид с высотой 5 мм, длиной основания 8 мм, шириной основания 4 мм и расстоянием между центрами неоднородностей 4 мм (рис. 6.26.).

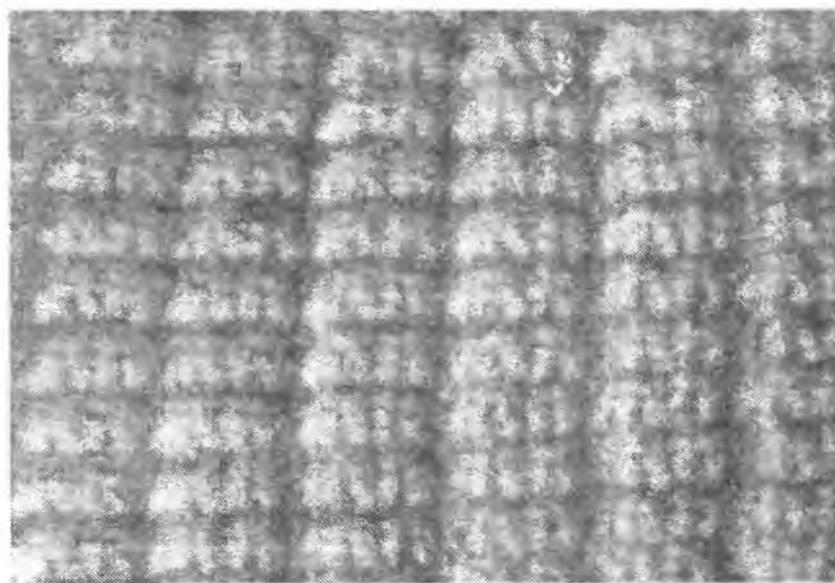


Рис. 6.26. Внешний вид фрагмента поверхности комбинированного переплетения – чередование неполного ластика с полной и неполной гладью (ПМПНЛ/ПГ(НГ)-5-4)

Машинно-вязаное полотно пятого варианта, представляет собой также сложное комбинированное переплетение, в котором ряды неполного ластика чередуются с рядами полной и неполной глади. Однако при различной последовательности провязывания полиэфирной высокоусадочной нити 16,8 текс и основной пряжи, геометрические неоднородности псевдопирамидальной формы получаются как с лицевой, так и с изнаночной сторон полотна. Машинно-вязаная основа этого образца имеет формоустойчивую структуру, высоту псевдопирамид

6 мм, длину основания неоднородностей 5 мм и ширину основания 2 мм, при расстоянии между центрами неоднородностей 4 мм (рис. 6.27.).

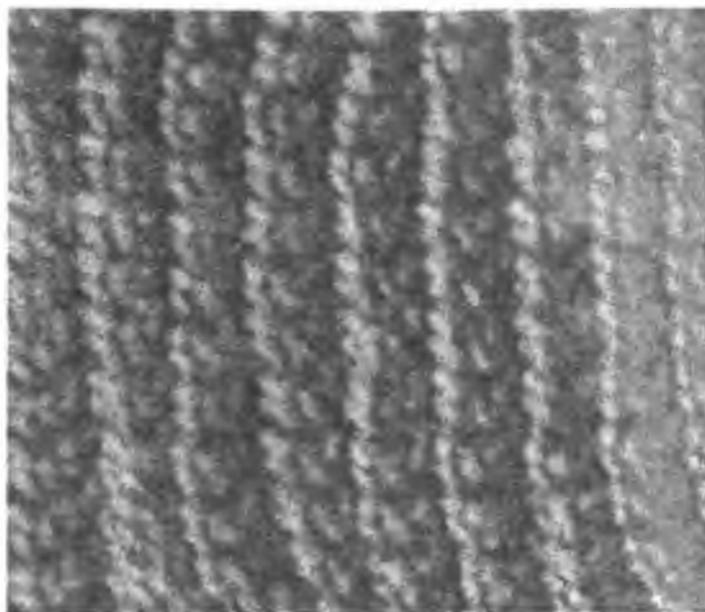


Рис. 6.27. Внешний вид фрагмента поверхности комбинированного переплетения – чередование неполного ластика с полной и неполной гладью (ПМПНЛ/ПГ(НГ)-6-4)

Образцы шестого, седьмого и восьмого вариантов, представляют собой простые комбинированные переплетения, в которых чередуются ряды полного ластика и полной глади (рис. 6.28-6.30). В зависимости от раппорта вяжется поочередно ряд ластика и несколько рядов глади. С лицевой стороны образцов четко выражен рельеф в форме псевдопирамид и достигается он за счет того, что ряды глади (псевдопирамиды) наработываются на определенных иглах (согласно раппорту), а часть игл удерживают старые петли. Высота неоднородностей зависит от соотношения длины петель глади и ластика, от числа петельных рядов глади в валике.

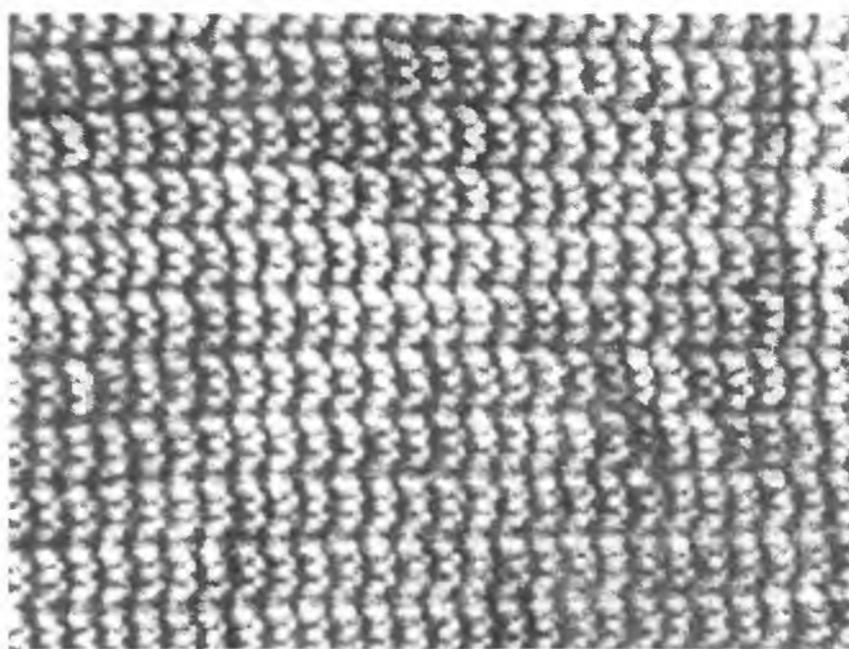


Рис. 6.28. Внешний вид фрагмента поверхности комбинированного переплетения – чередование неполного ластика с полной гладью (ПМПНЛ/ПГ-2-4)

При выработке образцов удалось наработать гладью на одной игольнице максимально 8 рядов. При наработке такого количества рядов глади приходилось применять дополнительную оттяжку – подвешивать на края полотна грузы. Рельефная форма была сформирована не только из-за структуры переплетения, но и за счет ввода в структуру трикотажа комплексной высокоусадочной полиэфирной нити 16,8 текс. В результате чего высота неоднородностей для шестого образца составляет 2 мм, а для седьмого и восьмого – 6 мм. Шестой и седьмой образцы имеют длину неоднородностей 6 мм, для восьмого образца этот параметр равен 8 мм, ширина основания неоднородности у седьмого и восьмого образцов равны 6 мм, для шестого образца это значение составляет 2 мм. Расстояние между центрами неоднородностей распределяются следующим образом: 4 мм – шестой, 6 мм – седьмой, 10 мм – восьмой образцы.

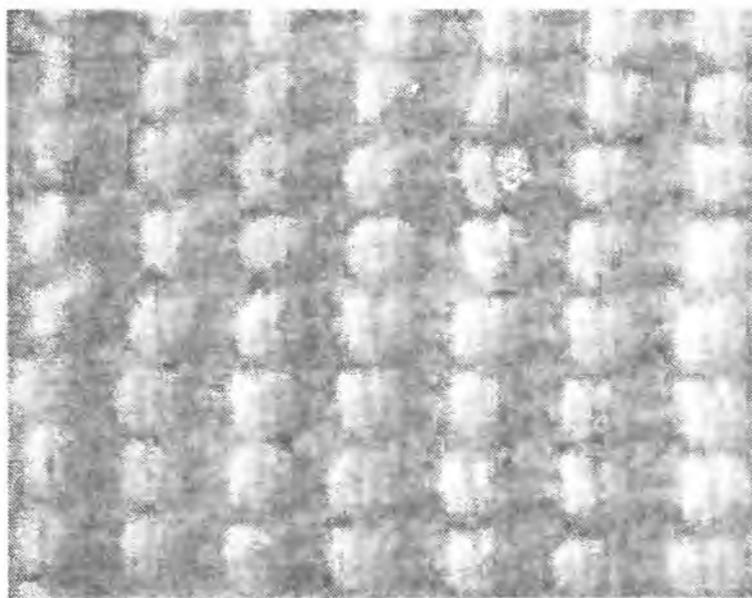


Рис. 6.29. Внешний вид фрагмента поверхности комбинированного переплетения – чередование полного ластика с полной гладью (ПМППЛ/ПГ-6-6)

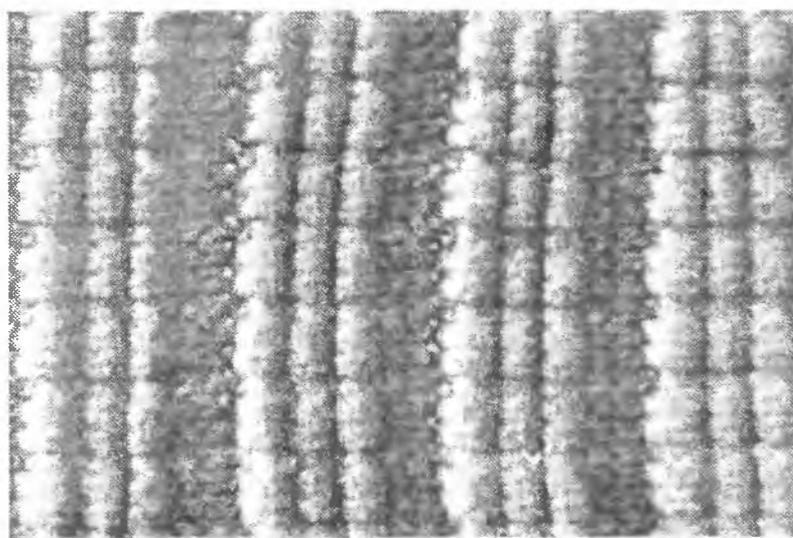


Рис. 6.30. Внешний вид фрагмента поверхности комбинированного переплетения – чередование полного ластика с полной гладью (ПМППЛ/ПГ-6-10)

Машинно-вязанные полотна девятого и десятого предложенных вариантов, также представляют собой простые комбинированные переплетения, в которых чередуются ряды ластика и глади (рис. 6.31, рис. 6.32.). В этих образцах наиболее ярко выражен рельефный эффект, который приближается к неоднородности псевдопирамидального типа. Достигается это за счет того, что гладь (псевдопирамиды), наработанные на одной игольнице имеют различное количество рядов, а также за счет ввязывания в структуру переплетения комплексной полиэфирной высокоусадочной нити 16,8 текс. Высота псевдопирамид для девятого образца достигает значения 7 мм, при длине их основания 18 мм и ширине 10 мм, расстояние между центрами неоднородностей составляет 5 мм. Геометрические параметры для неоднородностей десятого образца следующие: высота – 9 мм, длина основания псевдопирамиды – 22 мм, ширина – 20 мм, расстояние между центрами неоднородностей - 7 мм.

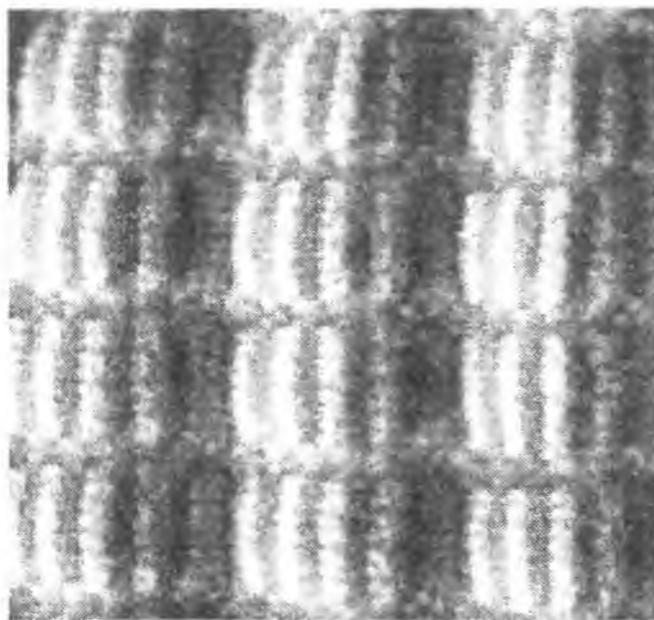


Рис. 6.31. Внешний вид фрагмента поверхности комбинированного переплетения – чередование ластика и глади (ПМПЛ/Г-7-5)

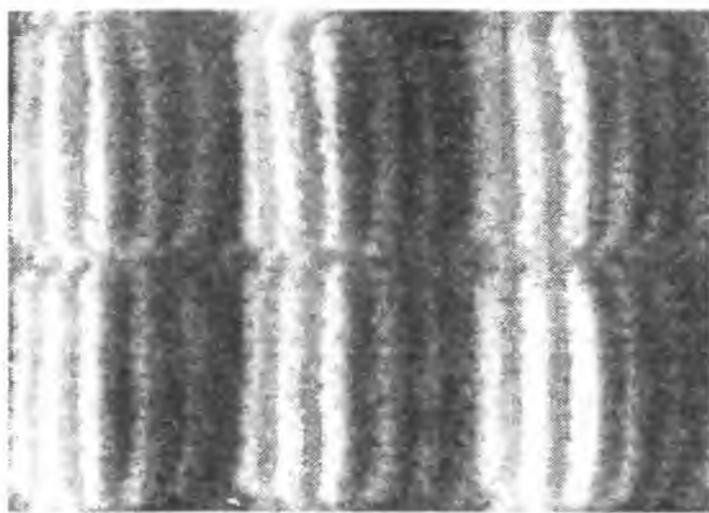


Рис. 6.32. Внешний вид фрагмента поверхности комбинированного переплетения – чередование ластика и глади (ПМПЛ/Г-9-7)

Заправка нитей и технологические параметры выработанных полотен представлены в табл. 6.1.

Как показал эксперимент, на образцах данных переплетений были получены полотна с наибольшим перепадом высот рельефной поверхности и в наибольшей степени приблизится по конструкции рельефа к псевдопирамидам (табл. 6.2).

Таблица 6.1

Заправочная таблица параметров сурового машинно-вязаного полотна

| № образца | Оборудование | Заправка | Кол-во на 10 см петельных | | Длина нити в петле, мм | Поверхностная плотность ρ , г/м ² |
|-----------|---------------|--|---------------------------|------------------|------------------------|---|
| | | | рядов, N_p | столбиков, N_c | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | ПВК-М 6 кл | ПАН 33 текс х2х3 | Л=45 И=45 | Л=24 И=24 | 8,5 | 674 |
| | | х/б 18,6 текс х2х8 | Л=40 И=38 | Л=22 И=22 | 8,5 | 918 |
| 2 | ПВК-М 6 кл | ПАН 33 текс х2х3 | Л=74 И=37 | Л=18 И=18 | 10,5 | 421 |
| | | х/б 18,6 текс х2х8 | Л=72 И=35 | Л=20 И=20 | 11 | 607 |
| 3 | ПВК-М 6 кл | ПАН 33т текс х2х3 | Л=81 И=40 | Л=32 И=16 | 7,2 | 681 |
| | | х/б 18,6т текс х2х8 | Л=80 И=40 | Л=30 И=18 | 7,2 | 947 |
| 4 | ПВК-М 6 кл | ПАН – 33 текс х2х2 + НПэф 16,8 текс х7 | Л=50 И=60 | Л=40 И=40 | 9,5 | 636 |
| | | х/б – 18,6 текс х2х7 + НПэф 16,8 текс х7 | Л=45 И=50 | Л=40 И=40 | 9,5 | 699 |
| 5 | ПВК-М 6 кл | ПАН – 33 текс х2х2 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 2, 6) | Л=55 И=70 | Л=40 И=40 | 9,5 | 517 |
| | | х/б – 18,6 текс х2х7 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 2, 6) | Л=55 И=70 | Л=40 И=40 | 9,5 | 602 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|---------------|--|---------------|--------------|------|-----|
| 6 | ПВК-М 6 кл | ПАН – 33 текс х2х2 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 1, 2) | Л=180 И=50 | Л=40 И=40 | 10,0 | 669 |
| | | х/б – 18,6 текс х2х7 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 1, 2) | Л=170 И=50 | Л=40 И=40 | 10,0 | 917 |
| 7 | ПВК-М 6 кл | ПАН – 33 текс х2х2 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 1, 2, 11, 12) | Л=100 И=50 | Л=40 И=40 | 10,0 | 608 |
| | | х/б – 18,6т х2х7 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 1, 2, 11, 12) | Л=100 И=50 | Л=40 И=40 | 10,0 | 786 |
| 8 | ПВК-М 6 кл | ПАН – 33 текс х2х2 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 5, 6, 15, 16, 25, 26, 35, 36) | Л=170 И=60 | Л=40 И=40 | 10,0 | 621 |
| | | х/б – 18,6 текс х2х7 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 5, 6, 15, 16, 25, 26, 35, 36) | Л=170 И=60 | Л=40 И=40 | 10,0 | 845 |
| 9 | ПВК-М 6 кл | ПАН – 33 текс х2х2 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 3, 4, 9, 10, 17, 18, 27, 28, 35, 36, 41, 42) | Л=160 И=60 | Л=40 И=40 | 10,0 | 614 |
| | | х/б – 18,6 текс х2х7 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 3, 4, 9, 10, 17, 18, 27, 28, 35, 36, 41, 42) | Л=160 И=60 | Л=40 И=40 | 10,0 | 743 |
| 10 | ПВК-М 6 кл | ПАН – 33 текс х2х2 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 3, 4, 9, 10, 17, 18, 27, 28, 35, 36, 41, 42) | Л=130 И=40 | Л=40 И=40 | 10,0 | 580 |
| | | х/б – 18,6 текс х2х7 НПэф - 16,8 текс х7 (ряды 3, 4, 9, 10, 17, 18, 27, 28, 35, 36, 41, 42) | Л=130 И=40 | Л=40 И=40 | 10,0 | 688 |

Каждый из образцов имеет наименование, состоящее из 4-9 букв и 2 цифр

Первая и вторая буквы обозначают на способ производства полотна:

ПМ – полотно машинно-вязаное.

Третья буква обозначает на форму неоднородностей:

Г – гофры,

П – псевдопирамиды.

Четвертая и пятая буквы обозначают вид переплетения:

П – полуфанг,

Л – ластик,
 Г – гладь,
 ПЛ – полный ластик,
 НП – неполный ластик,
 ПГ – полная гладь,
 НГ – неполная гладь.

Таблица 6.2

Геометрические параметры неоднородностей образцов выполненных по разработанной технологии

| № образца | Наименование | Вид переплетения | Высота неоднородностей, мм | Длина основания неоднородностей, мм | Ширина основания неоднородностей, мм | Расстояние между центрами неоднородностей, мм | Форма неоднородностей |
|-----------|-------------------|--|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | ПМГП-6-4 | Полуфанг | 6 | - | 4 | 4 | Гофры |
| 2 | ПМГП-6-10 | Полуфанг (I=2) | 6 | - | 4 | 10 | Гофры |
| 3 | ПМГЛ-3-4 | Неполный ластик | 3 | - | 6 | 4 | Гофры |
| 4 | ПМГНЛ/ПГ (НГ)-5-4 | Чередование неполного ластика с полной и неполной гладью | 5 | 8 | 4 | 4 | Псевдопирамиды |
| 5 | ПМГНЛ/ПГ (НГ)-6-4 | Чередование неполного ластика с полной и неполной гладью | 6 | 5 | 2 | 4 | Псевдопирамиды |
| 6 | ПМГНЛ/ПГ-2-4 | Чередование полного ластика и полной глади | 2 | 6 | 2 | 4 | Псевдопирамиды |
| 7 | ПМГЛ/ПГ-1-6 | Чередование полного ластика и полной глади | 6 | 6 | 6 | 6 | Псевдопирамиды |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|--------------|--|---|----|----|----|----------------|
| 8 | ПМПЛ/ПГ-6-10 | Чередование полного ластика и полной глади | 6 | 8 | 6 | 10 | Псевдопирамиды |
| 9 | ПМПЛ/Г-7-5 | Чередование ластика и глади | 7 | 18 | 10 | 5 | Псевдопирамиды |
| 10 | ПМПЛ/Г-9-7 | Чередование ластика и глади | 9 | 22 | 20 | 7 | Псевдопирамиды |

В случае чередования двух переплетений в процессе вязания, чередующиеся переплетения записывается через наклонную черту (четвертая-седьмая буквы), например: ПЛ/ПГ – чередование полного ластика и полной глади.

Если в процессе вязания имеет место чередования трех переплетений, то первое и второе указывается в соответствии с записью чередования двух переплетений, после чего в круглых скобках следует (восьмая, девятая буквы) обозначение третьего используемого переплетения, например: НЛ/ПГ(НГ) – чередование неполного ластика с полной и неполной гладью.

Первая цифра, следующая после буквенного обозначения указывает на высоту неоднородностей в миллиметрах. Вторая цифра обозначает расстояние между неоднородностями в миллиметрах. Рассмотрим несколько примеров:

ПМП-6-10 – полотно машинно-вязаное с геометрическими неоднородностями гофрированной формы высотой 6 мм и расстоянием между центрами неоднородностей 10 мм, вид переплетения - полуфанг;

ПМПЛ/Г-7-5 - полотно машинно-вязаное с геометрическими неоднородностями псевдопирамидальной формы высотой 7 мм и расстоянием между центрами неоднородностей 5 мм, вид переплетения – чередование ластика и глади;

ПМПНЛ/ПГ(НГ)-5-4 - полотно машинно-вязаное с геометрическими неоднородностями псевдопирамидальной формы высотой 5 мм и расстоянием между центрами неоднородностей 4 мм, вид переплетения – чередование неполного ластика с полной и неполной гладью.

6.2. Экранирующие свойства трикотажных полотен с металлическими нитями

6.2.1. Особенности трикотажных полотен для электромагнитных экранов

Наиболее простым способом формирования гибких трикотажных экранов является вязание металлической нити или микропровода совместно с ассистирующей нитью на трикотажном вязальном оборудовании [339]. Для формирования таких полотен могут быть использованы как основовязанные, так и кулирные трикотажные машины. Вязание на основовязанных машинах затруднено необходимостью одновременно заправлять большое число нитей и сложностью контроля процесса.

Для проведения испытаний изготавливаются несколько образцов, различающиеся по способу формирования полотен и параметрам процесса. Образцы первой партии вязались на кругловязальных машинах 16 класса, позволяющих получать трикотажные полотна из синтетической пряжи линейной плотностью 15,6 текс, с использованием переплетения производная гладь. Совместно с каждой нитью провязывался микропровод из нержавеющей стали диаметром 0,08 или 0,055 мм. Параметры ячеек приведены в табл. 6.3.

Для исследования влияния материала и толщины микропровода при различных параметрах процесса вязания полотна были изготовлены трикотажные полотна со стабилизированным строением. В качестве базового переплетения использовалась кулирная гладь.

Таблица 6.3

Параметры элементарных ячеек в полотне

| Образец | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------|------|------|------|------|
| 2А, мм | 2,32 | 2,44 | 2,63 | 2,44 |
| В, мм | 0,91 | 0,75 | 1,04 | 1,04 |
| Р, мм | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,5 |

Полотна вязались на кругловязальных машинах 17 класса с использованием микропровода из нержавеющей стали диаметром 0,04; 0,05 и 0,08 мм, меди диаметром 0,05 мм, никеля диаметром 0,05 мм и комплексной нити, полученной скручиванием медной и серебряной пряжи, диаметр которой составил 0,13 мм. Геометрические параметры полотен следующие: А=1,42 или 2,0 мм, В=1,42 или 2,22 мм. Дополнительно был изготовлен образец из стального микропровода диаметром 0,08 мм без ассистирующей нити, что позволило получить трикотажное полотно с улучшенным электрическим контактом между ячейками сетки.

После вязания образцов проводилась стабилизация геометрических параметров полотен путем их термообработки при температуре 180⁰С в течение 20 мин. При испытаниях полотен они находились в натянутом состоянии, которое обеспечивалось путем размещения куска полотна на каркасе из картона.

Отдельно следует рассмотреть формирование гибких сетчатых экранов на основовязаном оборудовании. На основовязанных машинах получают изделия с повышенной плотностью и заполнением полотна материалом. Процесс вязания таких полотен из микропровода имеет недостатки, обусловленные сложностью организации подачи и прокладывания нитей, контроля обрыва нити и восстановления нити в месте обрыва. Образец основовязаного трикотажа изготавливался из стальной микропроволоки на трикотажной машине 21 класса без ввязывания в структуру полимерной пряжи. Используемое переплетение – трико. При этом было получено полотно, стойкое к распусканию и механическим

нагрузкам, но обладающее закручиваемостью по направлению петельного ряда и петельного столбика.

6.2.2. Экранирующие свойства трикотажных полотен со встроенным металлическим микропроводом

Для определения экранирующих свойств трикотажных полотен, содержащих микропровод, проводились измерения общей эффективности экранирования электромагнитного излучения описанными выше образцами. Образцы полотен помещались между излучателем и приемником и измерялась напряженность электромагнитного поля до и после установки экрана на пути ЭМИ в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ЭМВ. Эффективность экранирования в частотном диапазоне 0,1-1000 МГц определяется и представляется в относительных единицах в логарифмическом масштабе. Результаты измерений носят усредненный по всей поверхности полотна характер и сглаживаются для исключения шумовых выбросов, обусловленных случайными погрешностями измерительного оборудования. Кроме того, производится оценка отражения и поглощения электрической и магнитной составляющих поля. В результате было обнаружено, что трикотажные полотна с микропроводом подавляют ЭМИ радиочастотного диапазона в основном за счет отражения электрической составляющей электромагнитного поля.

Характеристики образцов переплетения производная гладь. Амплитудно-частотные характеристики эффективности экранирования ЭМИ образцами трикотажных полотен в зависимости от толщины микропровода, параметров переплетения и материала микропровода представлены на рис. 6.33, 6.34, 6.35. При исследовании зависимости эффективности экранирования ЭМИ от толщины микропровода использовались отрезки полотен с параметрами $A=1,22$ мм, $B=0,75$ мм, $R=1,5$ мм. Для различных образцов параметры переплетений соответствуют описанным в табл. 6.3.

Амплитудно-частотные характеристики эффективности экранирования ЭМИ имеют неоднородный характер. Неравномерность характеристик превышает 10 дБ практически для всех образцов. Следует отметить, что образцы, содержащие провод диаметром 0,055 мм, обладают более сглаженной характеристикой во всем измеряемом диапазоне. В области нижних частот использование проводников большего диаметра позволяет реализовать более эффективные экраны.

При испытании образцов с различными параметрами переплетения обнаружено, что трикотажные полотна, имеющие более плотное строение, подавляют излучение лучше в области нижних частот, а в области верхних частот диапазона 30-1000 МГц для них наблюдается более крутой наклон характеристики.

Максимальное значение эффективности экранирования не превышает 30 дБ для материалов с медным и серебряным микропроводом, но применение таких материалов ограничено узкой полосой рабочих частот.

Э, дБ

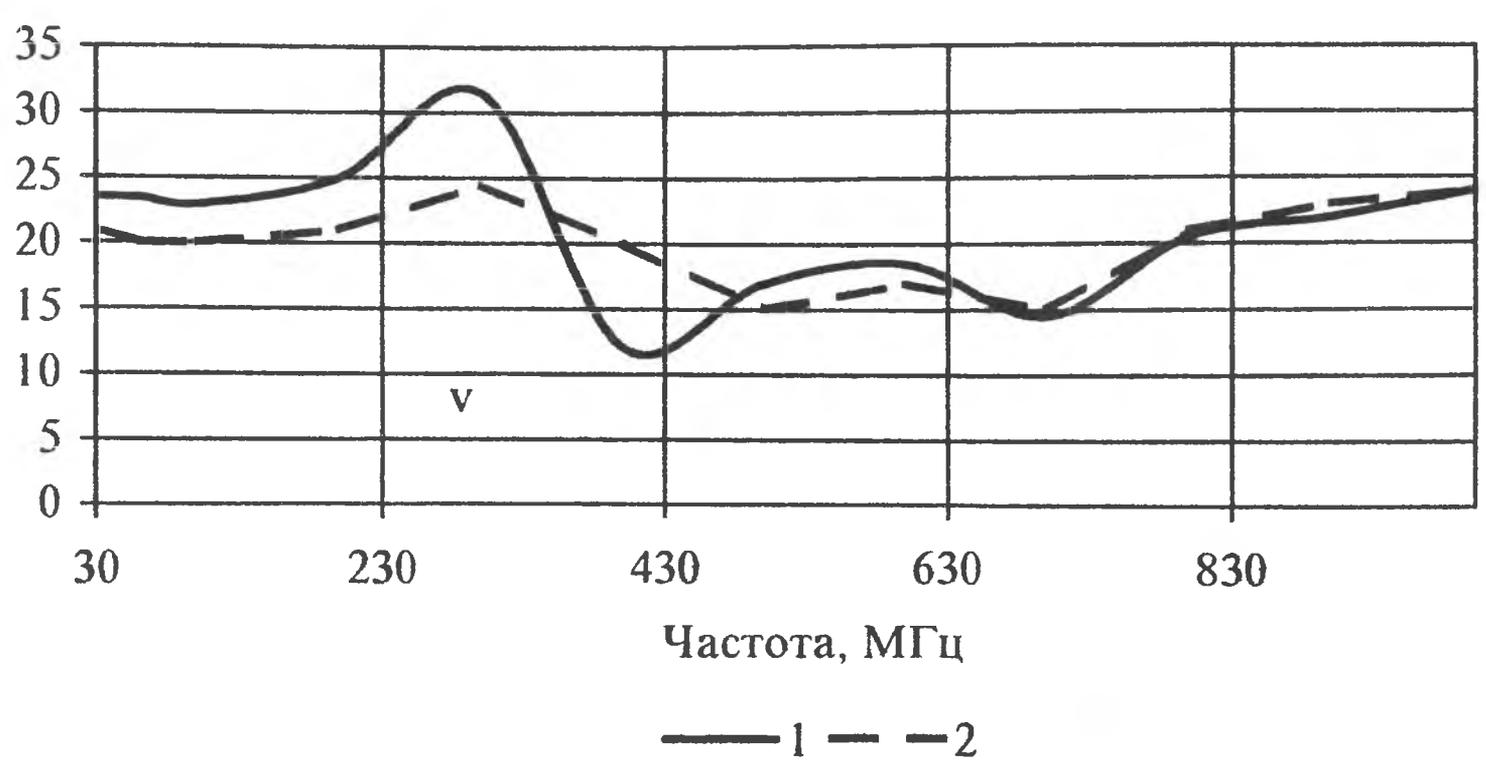


Рис. 6.33. Эффективность экранирования ЭМИ для образцов с различной толщиной микропровода: 1 – диаметр провода 0,08 мм, 2 – диаметр провода 0,055 мм

Э, дБ

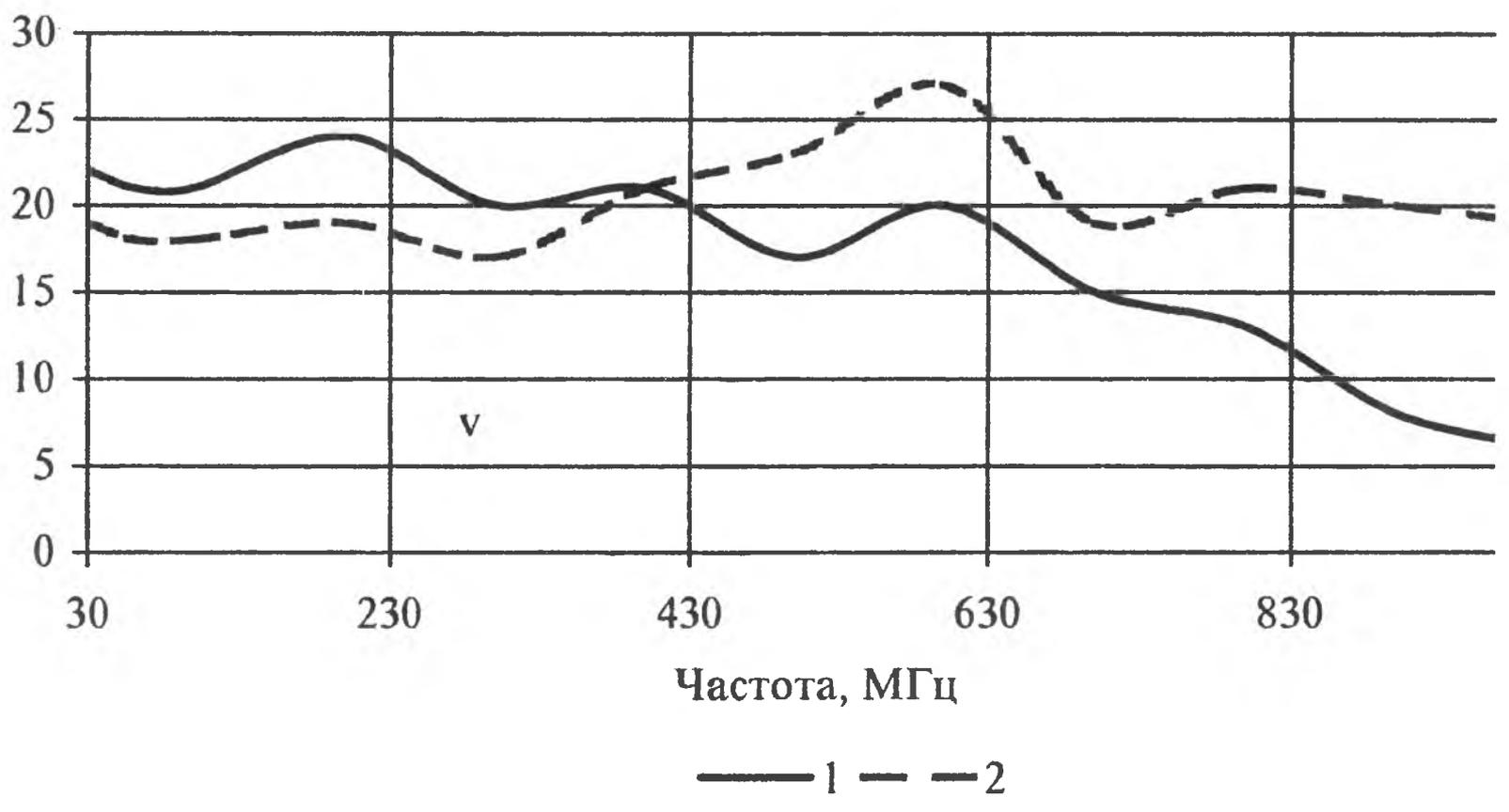


Рис. 6.34. Эффективность экранирования ЭМИ для образцов с различными геометрическими параметрами элементарной ячейки полотна: 1 – $2A=2,44$ мм, $B=0,75$ мм, $R=1,5$ мм; 2 – $2A=2,44$ мм, $B=1,04$ мм, $R=1,5$ мм

Наличие неоднородностей амплитудно-частотных характеристик экранирования обусловлено влиянием реактивной составляющей

сопротивления сетчатой структуры. При увеличении частоты все более значимую роль начинает играть индуктивность проводников и емкостные связи между отдельными участками ячеек, поэтому в этом диапазоне не наблюдается большой разницы в характеристиках экранов, содержащих стальной и медный микропровод. При использовании микропровода из различных материалов более эффективным оказался образец, содержащий медные проводники.

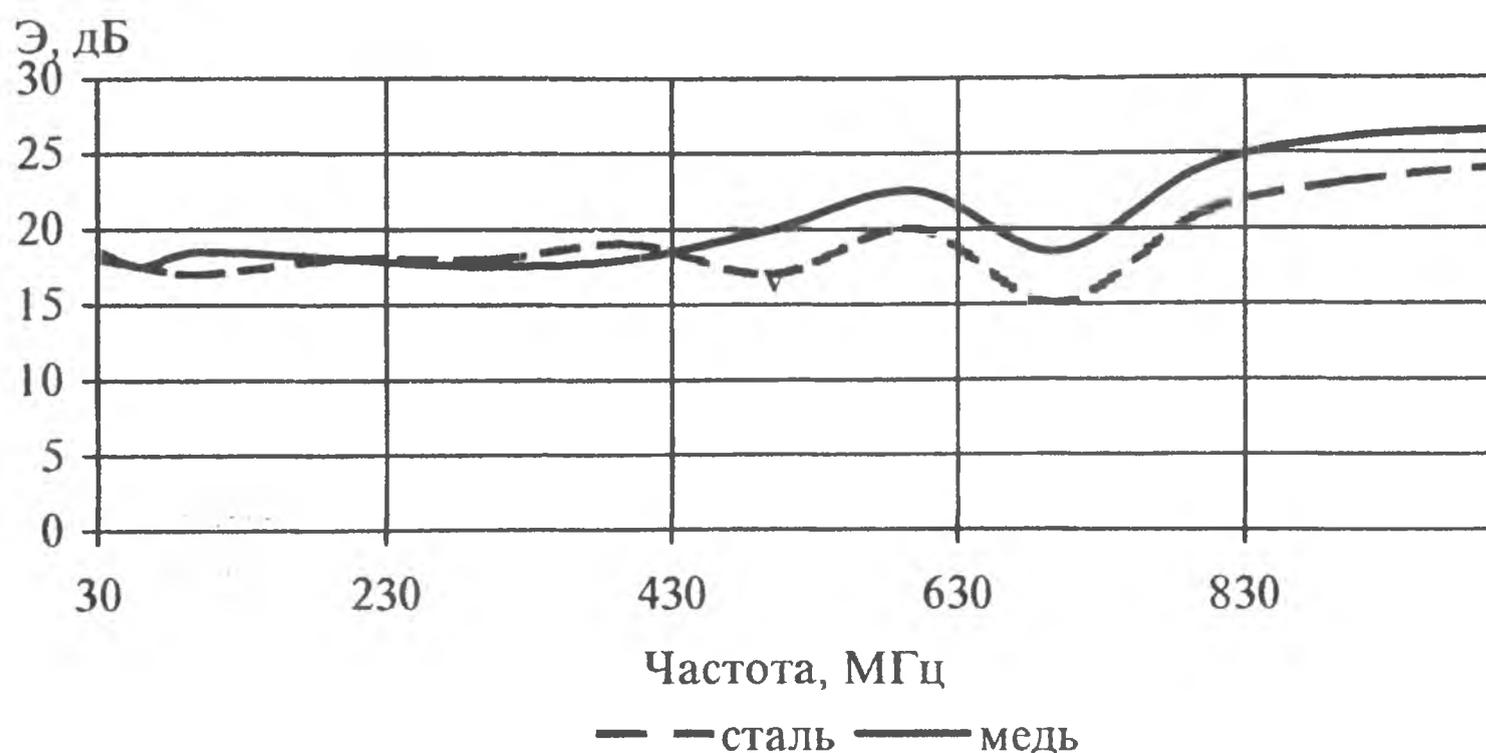


Рис. 6.35. Эффективность экранирования ЭМИ для образцов с микропроводом из разных материалов

Характеристики образцов переплетения гладь со стабилизированными геометрическими параметрами. Испытания образцов полотен, подвергнутых термообработке для стабилизации геометрических параметров полотна, проводились в частотном диапазоне от 0,1 до 1000 МГц по "классической" методике, как и в предыдущем случае. В диапазоне 1,5-27 ГГц с помощью измерителей S-параметров получены амплитудно-частотные характеристики коэффициента прохождения и коэффициента отражения экранов. Результаты также представлены в децибелах.

В диапазоне 0,1-1000 МГц для проведения испытаний образцы разделялись на несколько групп, отличающихся параметрами процесса вязания и материалом вводимого микропровода. Стабилизация геометрических параметров полотен позволила добиться более равномерной характеристики эффективности экранирования по площади экрана. Характеристики гибких электромагнитных экранов приведены в табл. 6.4-6.7 и на графиках.

В СВЧ диапазоне (1,5-37 ГГц) свойства экранов можно характеризовать S-параметрами пассивных четырехполюсников. Зависимости коэффициента передачи и отражения от диаметра и материала провода приведены на рис. 6.39-6.41. При исследовании влияния диаметра микропровода на экранирующие свойства изучались полотна с параметрами $A=1,42$ мм, $B=1,42$ мм, а влияния материала

микропровода – $A=2,0$ мм; $B=2,2$ мм. Амплитудно-частотная характеристика коэффициента отражения S_{11} откладывается по вспомогательной оси и изображается тонкой линией такого же типа, что и характеристика коэффициента передачи.

Таблица 6.4

Эффективность экранов от диаметра микропровода (материал – нержавеющая сталь, $A=1,42$ мм; $B=1,42$ мм), дБ

| Диаметр микропровода, мм | Частота, МГц | | | |
|--------------------------|--------------|-------|-----|------|
| | 0,1-5 | 10-70 | 100 | 1000 |
| 0,04 | 17 | 15 | 1 | 1 |
| 0,05 | 20 | 14 | 8 | 2 |
| 0,08 | 19 | 18 | 5 | 1 |

Таблица 6.5

Эффективность экранов от диаметра микропровода (материал – нержавеющая сталь, $A=2,0$ мм; $B=2,22$ мм), дБ

| Диаметр микропровода, мм | Частота, МГц | | | |
|--------------------------|--------------|-------|-----|------|
| | 0,1-5 | 10-70 | 100 | 1000 |
| 0,04 | 20 | 10 | 10 | 0,8 |
| 0,05 | 20 | 19 | 9 | 0,3 |
| 0,08 | 19 | 22 | 7 | 1 |

Таблица 6.6

Эффективность экрана от материала микропровода ($A=2,0$ мм; $B=2,2$ мм), дБ

| Материал и диаметр микропровода, мм | Частота, МГц | | | |
|-------------------------------------|--------------|-------|-----|------|
| | 0,1-5 | 10-70 | 100 | 1000 |
| Сталь, $d=0,05$ мм | 20 | 19 | 9 | 0,3 |
| Медь $d=0,05$ мм | 17 | 19 | 22 | 1,5 |
| Медь с серебром, $d=0,13$ мм | 21 | 25 | 22 | 2 |
| Никель, $d=0,063$ мм | 21 | 21 | 15 | 1 |

Таблица 6.7

Эффективность экрана от особенностей строения полотна ($A=2,0$ мм; $B=2,2$ мм), дБ

| Характеристика полотна | Частота, МГц | | | |
|--|--------------|-------|-----|------|
| | 0,1-5 | 10-70 | 100 | 1000 |
| Стальной микропровод без ассистирующей нити, $d=0,08$ мм | 24 | 24 | 20 | 2 |
| Стальной провод с нитью, $d=0,08$ мм | 19 | 22 | 7 | 1 |

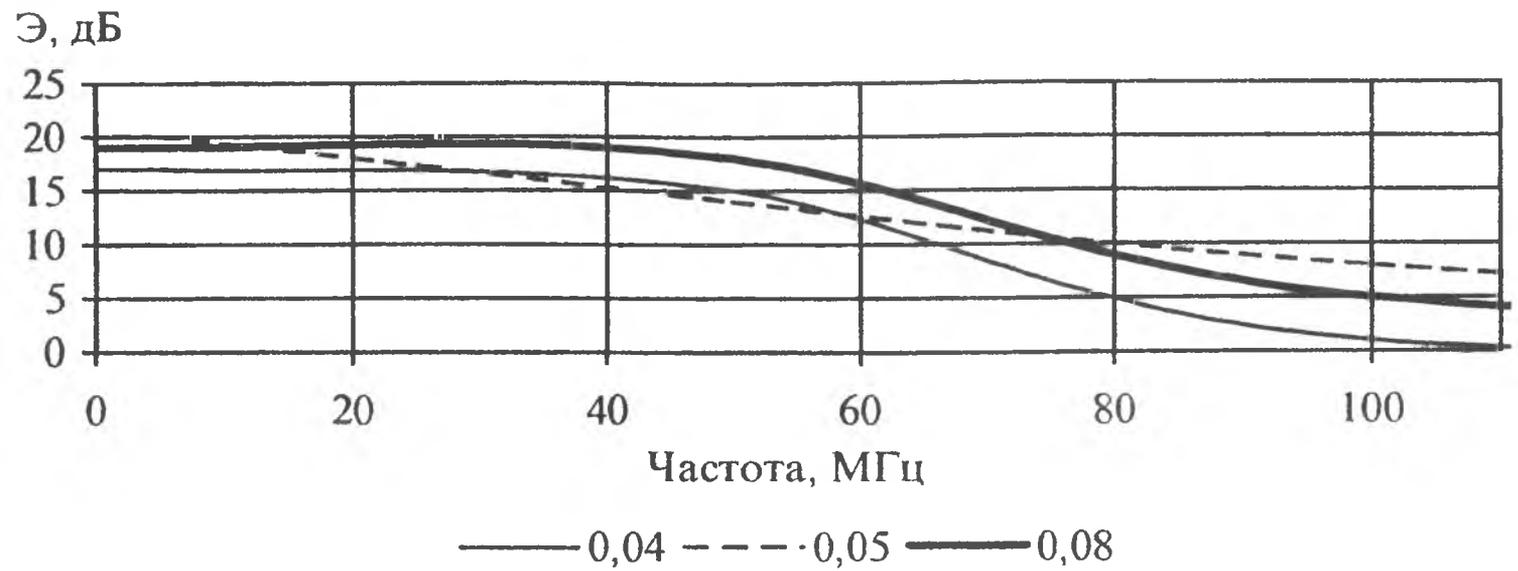


Рис. 6.36. Зависимость амплитудно-частотной характеристики эффективности экранов от диаметра микропровода

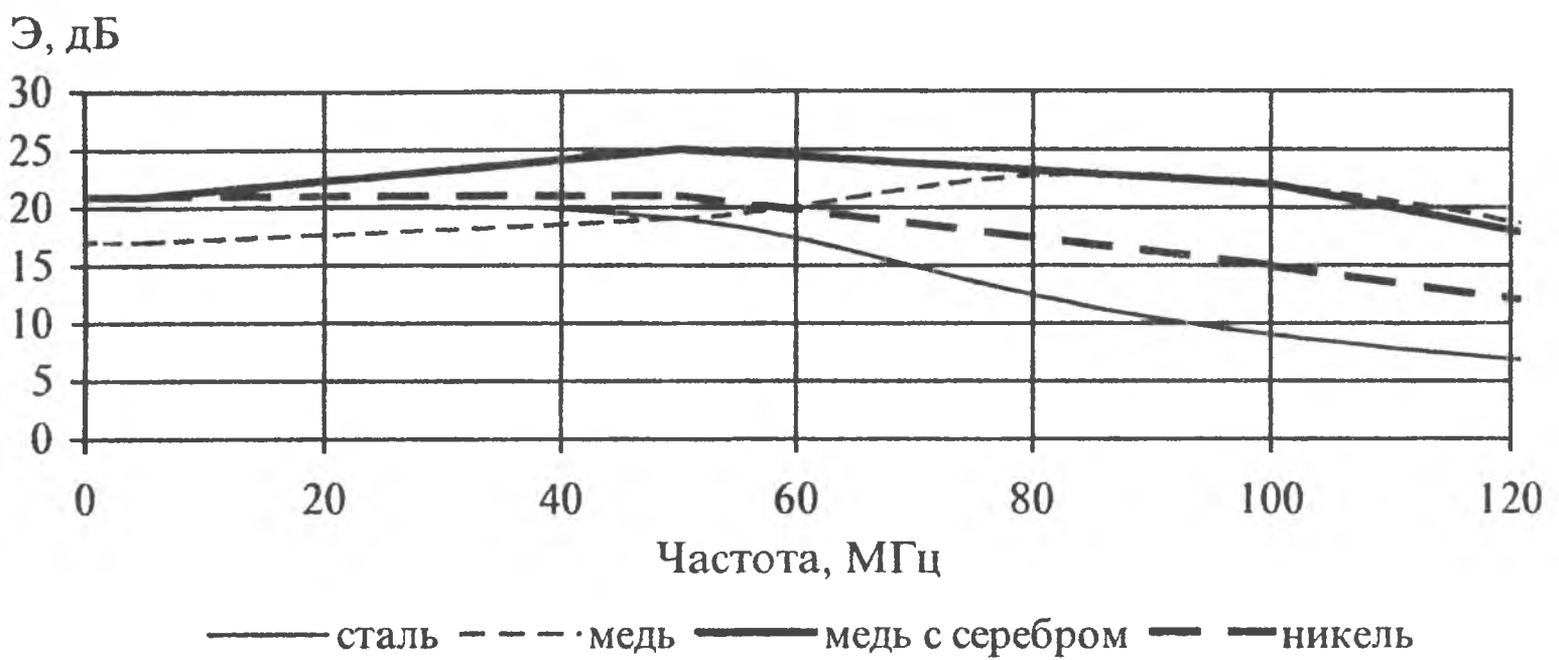


Рис. 6.37. Зависимость амплитудно-частотной характеристики эффективности экранов от материала микропровода

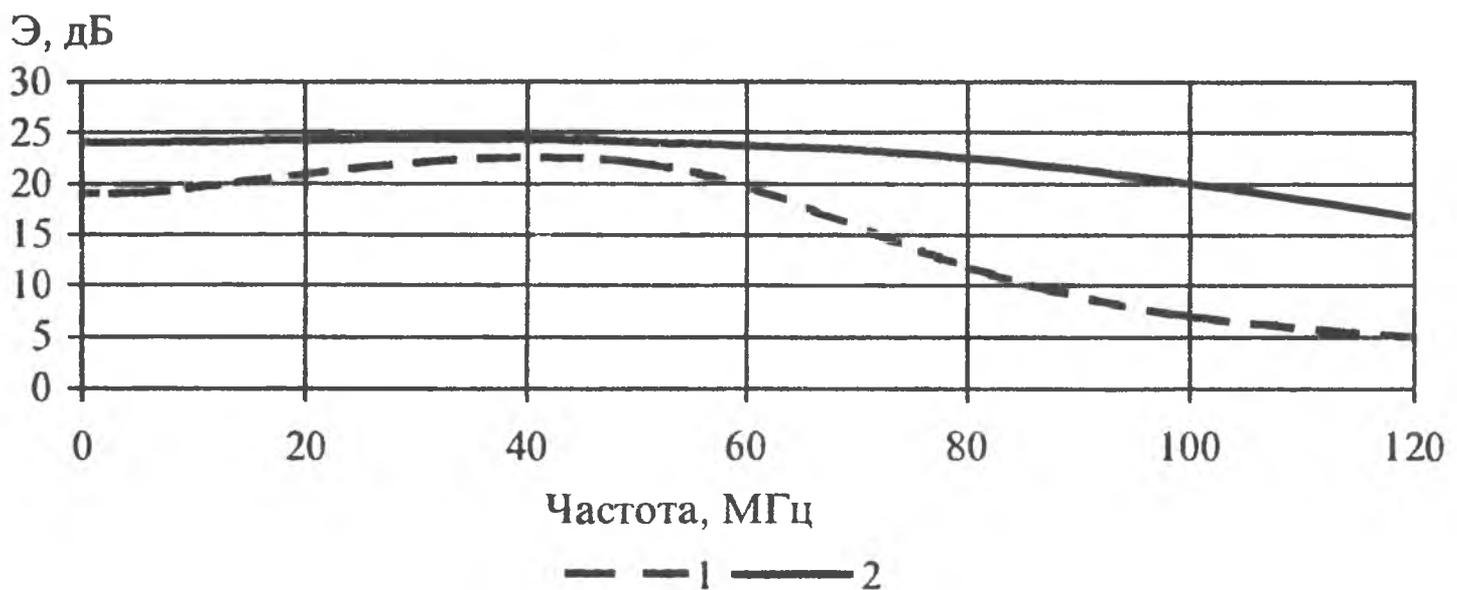
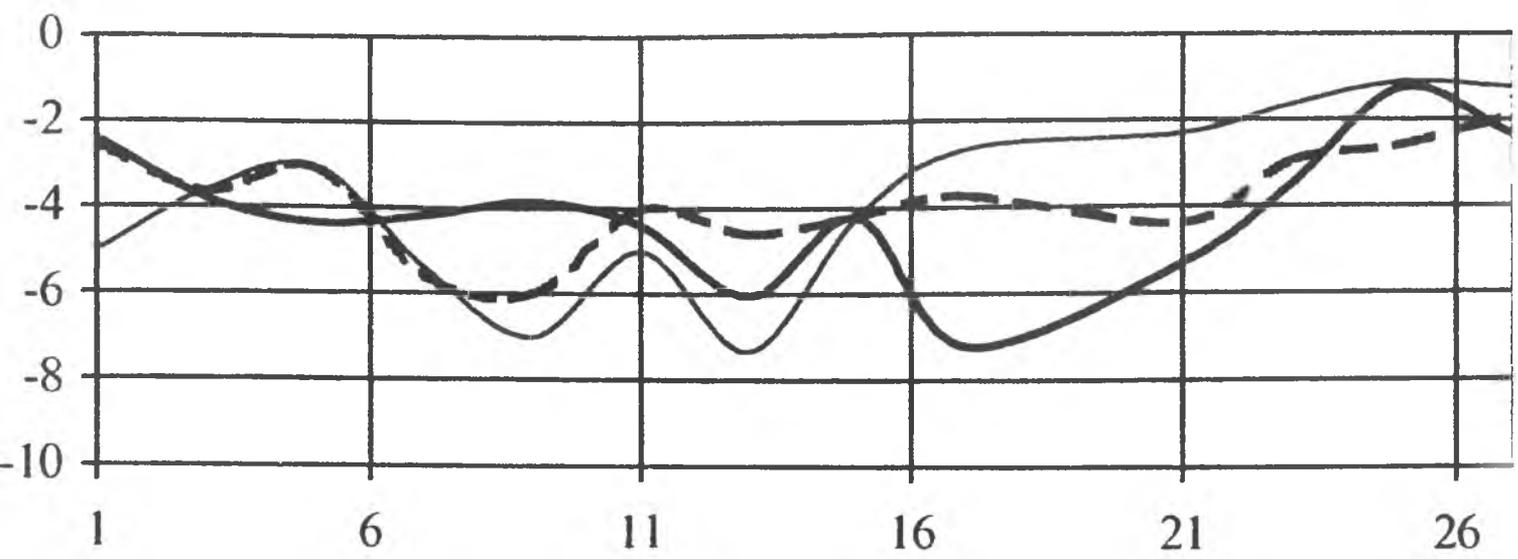


Рис. 6.38. Зависимость амплитудно-частотной характеристики эффективности экранов от строения полотна: 1 – микропровод провязан совместно с нитью; 2 - микропровод без ассистирующей нити

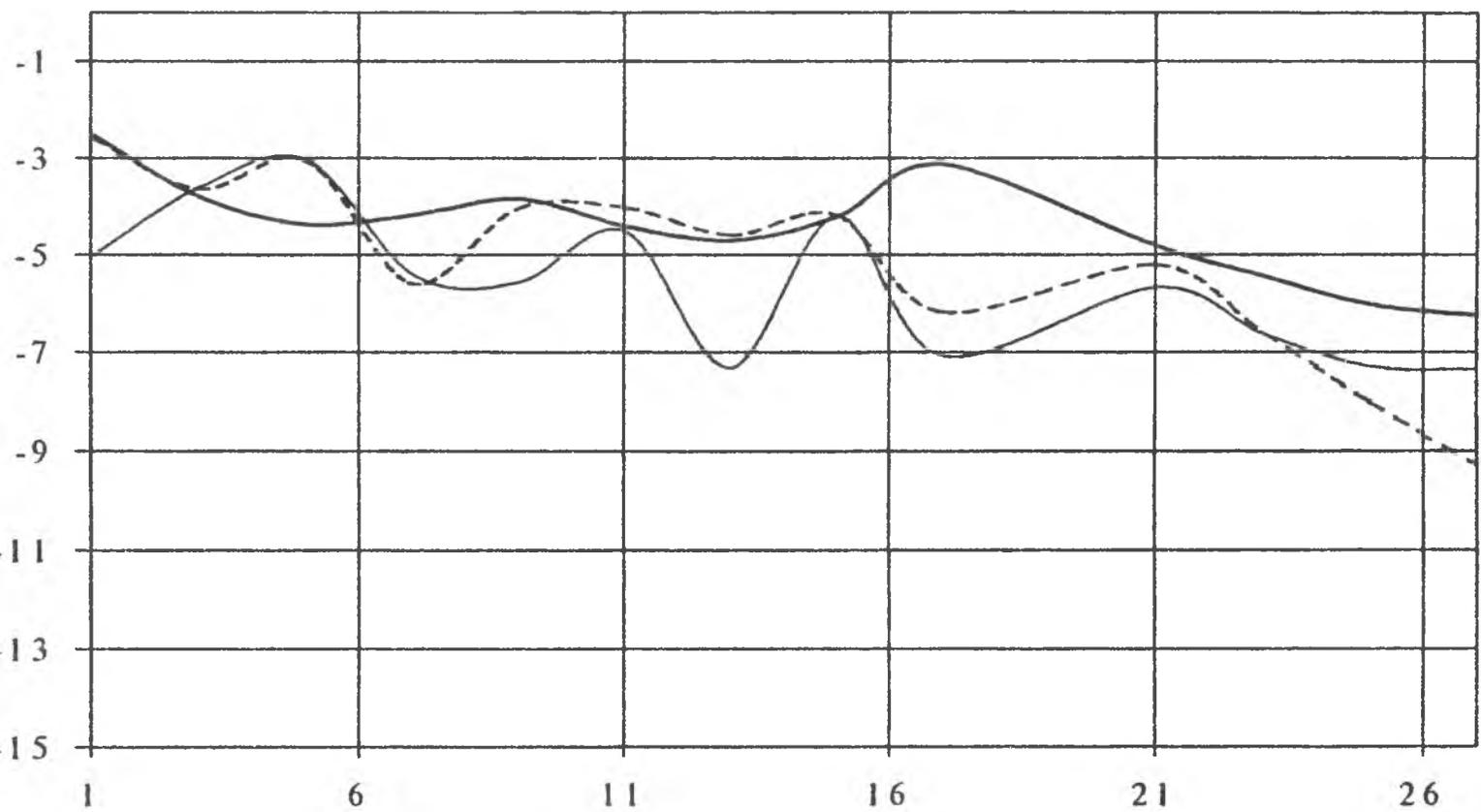
S21, дБ



Частота, ГГц

--- сталь — медь с серебром — сталь без нити

S11, дБ

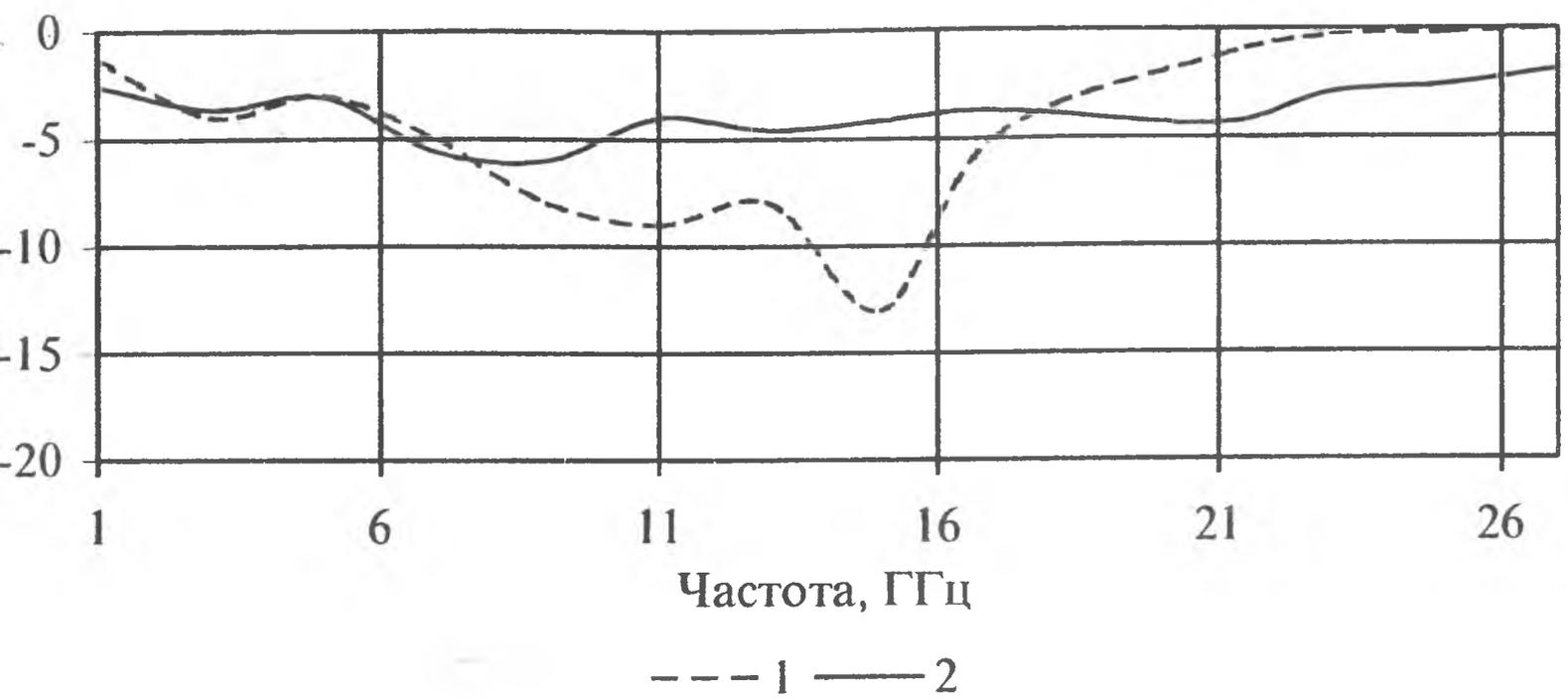


Частота, ГГц

--- сталь — медь с серебром — сталь без нити

Рис. 6.39. Зависимость коэффициентов передачи и отражения гибких электромагнитных экранов от материала микропровода

S21, дБ



S11, дБ

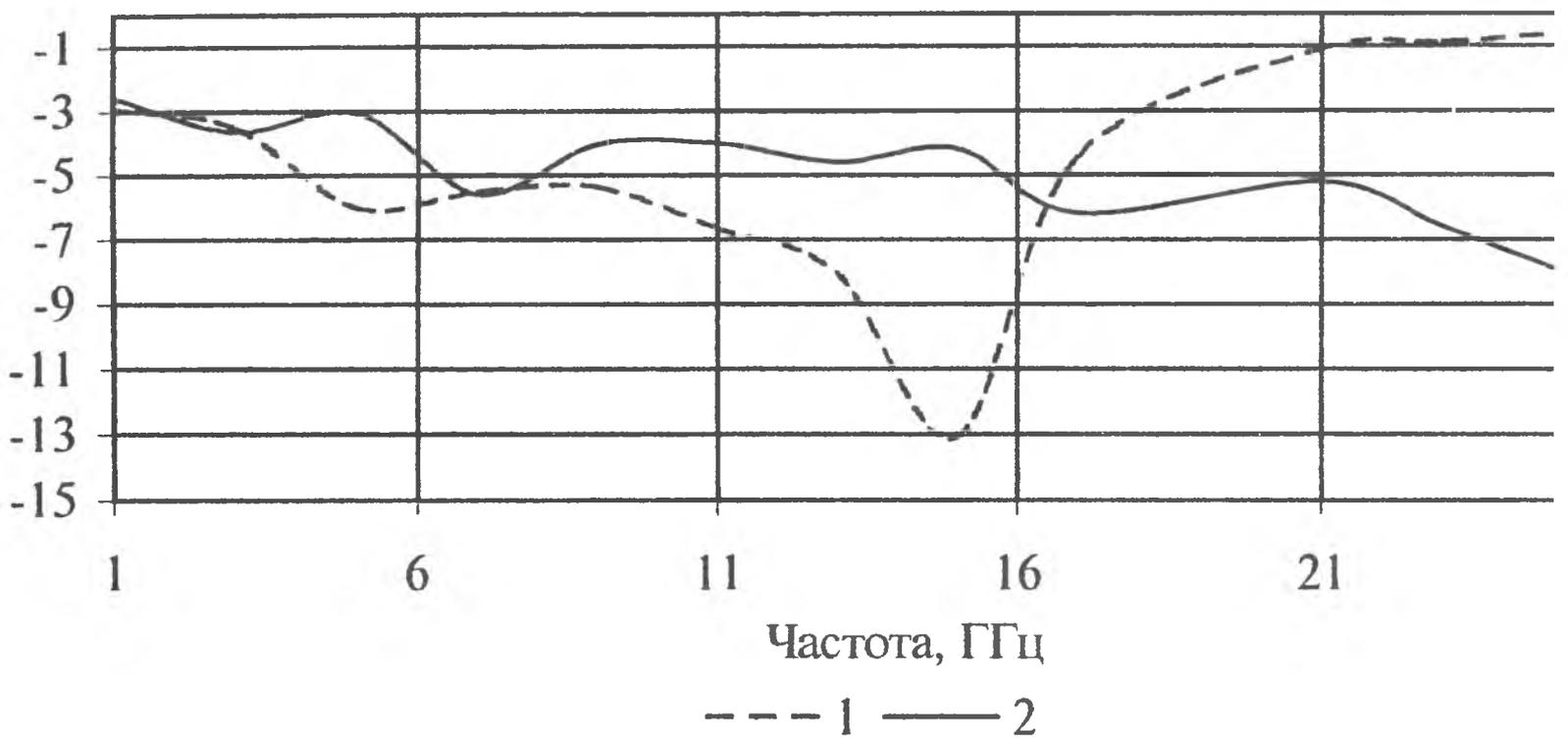


Рис. 6.40. Зависимость коэффициентов передачи и отражения гибких электромагнитных экранов от параметров переплетения: 1- $A=1,42$ мм, $B=1,42$ мм, 2- $A=2,0$ мм; $B=2,2$ мм

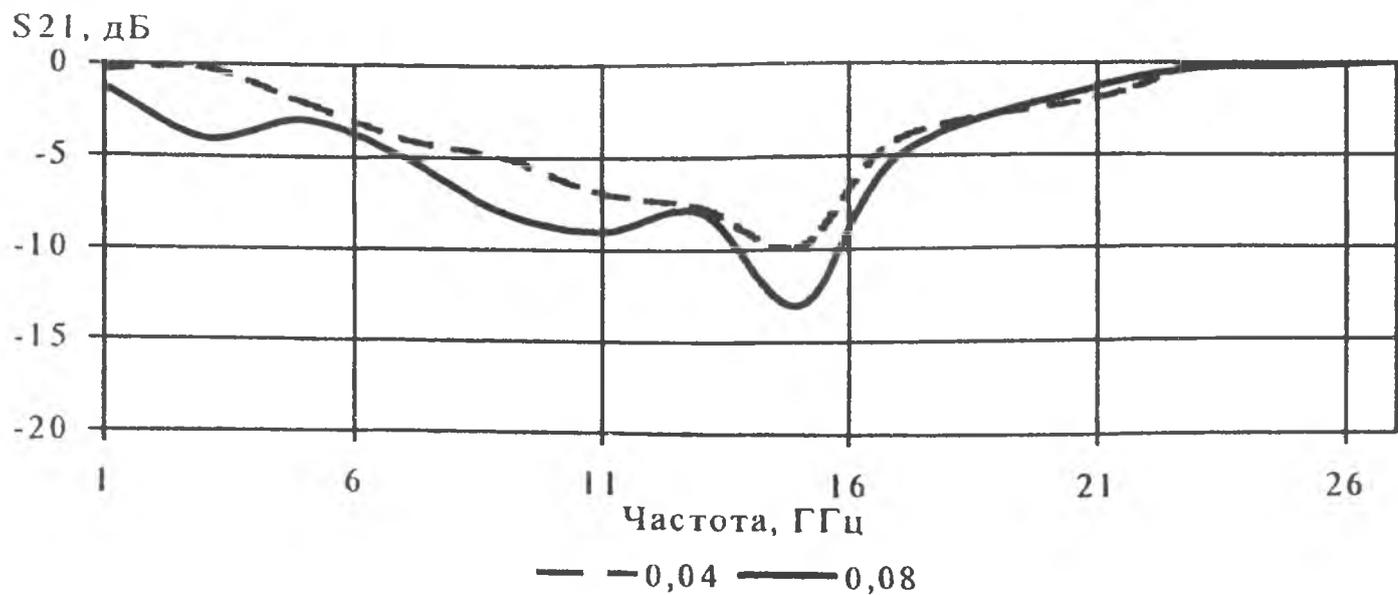


Рис. 6.41. Зависимость коэффициентов передачи и отражения гибких экранов от диаметра микропровода

Характеристики основовязаного трикотажа. Основовязанные трикотажные конструкции позволяют увеличить заполненность полотна материалом и добиться повышения равномерности поверхности экрана.

Для электромагнитного экранирования используется трикотажное полотно из металлического микропровода диаметром 0,13 мм с размерами отверстий примерно 1×1 мм. Исследования, проведенные в диапазоне частот 17-27 ГГц, показали, что такие экраны обладают более высокой эффективностью по сравнению с кулирными трикотажными полотнами, однако повышение эффективности таких конструкций происходит за счет отражения ЭМИ (рис. 6.42).

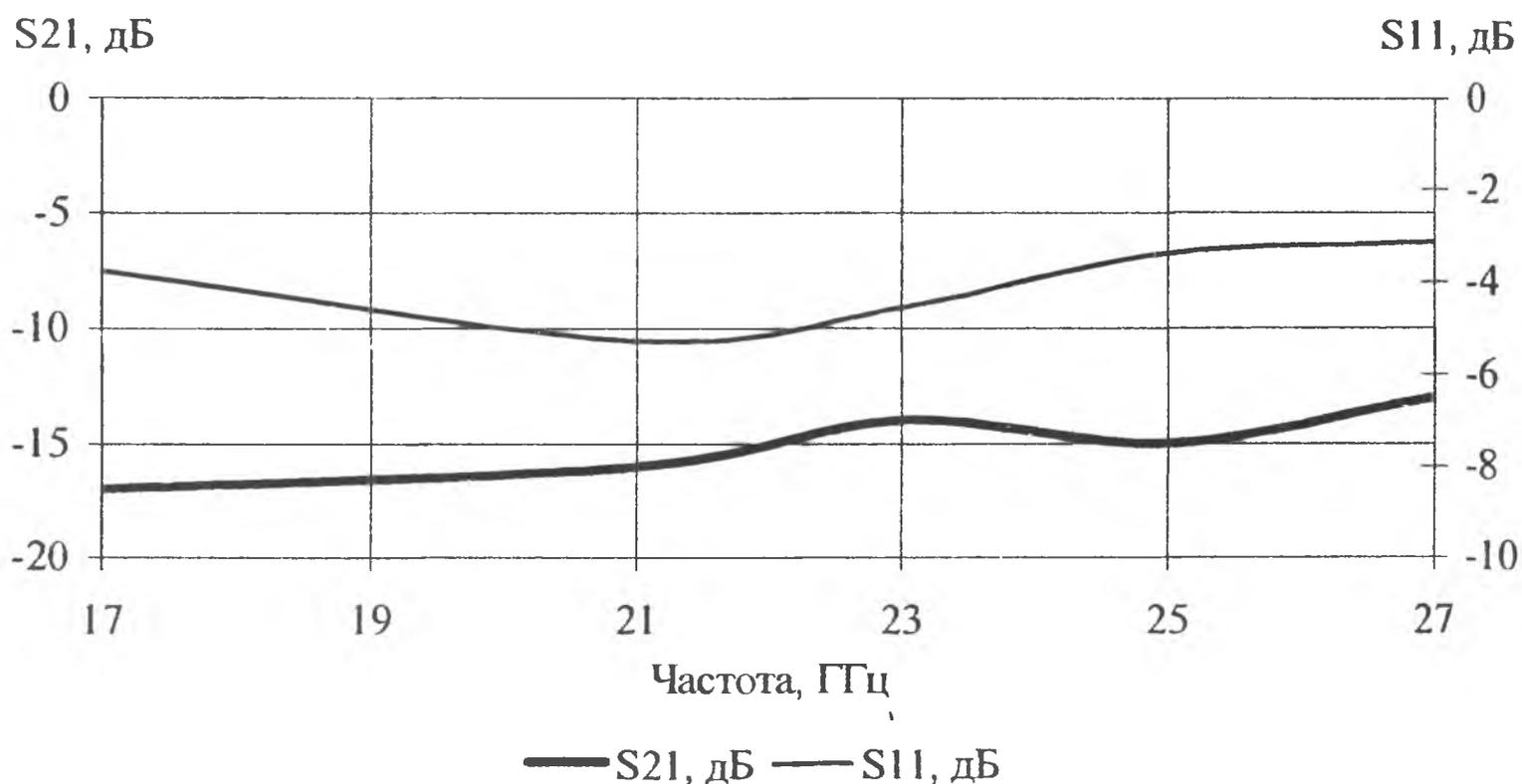


Рис. 6.42. Коэффициенты передачи и отражения основовязаного экрана

Повышения эффективности экрана можно добиться также, используя двухслойные и многослойные сетки (рис. 6.43). Однако эффективность повышается

до определенного предела и не превышает эффективности экранов из сплошных металлических листов.

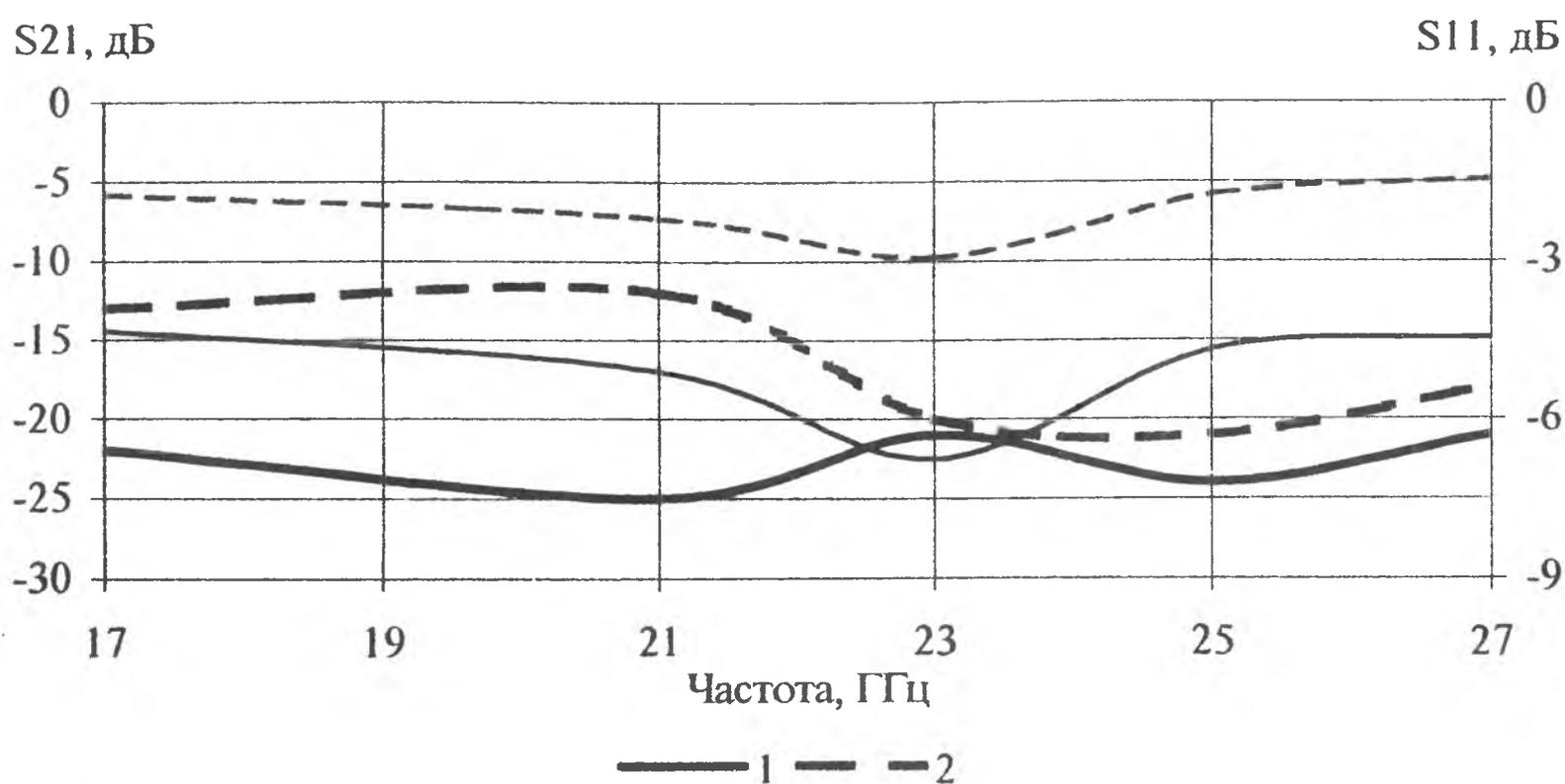


Рис. 6.43. Коэффициенты передачи и отражения двухслойных сетчатых экранов ЭМИ: 1 - основывающийся образец, 2 – кулирный образец

По результатам испытаний экранирующих свойств трикотажных полотен, получаемых по технологии ввязывания совместно с ассистирующей нитью или вместо нее металлического микропровода, можно сделать несколько основных выводов:

эффективность таких экранов, представляющих собой сетчатые структуры со сложной формой ячейки, уменьшается с увеличением частоты;

верхняя частота рабочего диапазона образцов, в котором эффективность экранирования ЭМИ не меньше 20 дБ, ограничивается несколькими сотнями мегагерц;

на низких частотах эффективность экранов может быть повышена с помощью использования материалов с высокой электропроводностью, например медь, серебро;

более эффективными в диапазоне низких частот являются экраны, содержащие микропровод большего диаметра, но при увеличении частоты эффективность экранов с различным диаметром микропроводов становится одинаковой;

увеличение эффективности экрана и расширение его рабочего диапазона достигается при уменьшении размеров ячеек в экране и использовании микропровода без ассистирующей нити.

Уменьшение эффективности сетчатых экранов при увеличении частоты обуславливается в первую очередь влиянием индуктивности проводов и емкостными взаимосвязями между ними, что увеличивает реактивную составляющую

сопротивления проводников. Согласно теоретическим предпосылкам эффективность экрана в области низких частот оказывается обратно пропорционально сопротивлению одного метра проволоки постоянному току [340]. При увеличении частоты вклад реактивного индуктивного сопротивления в общее сопротивление провода оказывается значительно больше активной части. Однако на эффективность экрана дополнительно оказывают влияние уменьшение переходных емкостных сопротивлений между проводами и поверхностный эффект. Благодаря этому на высоких частотах выигрыш от применения толстых проводников сравнительно невелик, так как происходит "вытеснение" тока на поверхность проводника, но при этом более жесткие требования предъявляются к поверхностному сопротивлению, которое зависит от состава и состояния поверхности проводника. Повышения эффективности и уменьшения анизотропии электрических свойств полотна в этом случае добиваются с помощью применения электропроводных и коррозионно-стойких покрытий из никеля [341]. В силу того, что у магнитных материалов толщина поверхностного слоя меньше чем у немагнитных, одинаковой эффективности в диапазоне высоких частот можно достигнуть, применяя проводники меньшей толщины, если они будут изготовлены из магнитного материала.

На СВЧ весомое влияние начинают оказывать геометрические размеры ячеек в сетке и заполненность ее металлическим материалом. При приближении длины волны к размерам отверстий в экране каждое из них становится излучателем, а эффективность сетки стремится к нулю.

Теоретическая оценка эффективности трикотажных полотен производилась по формулам, приведенным в работе [342]. Трикотажные экраны представляют собой редкие сетки, у которых отношение расстояния между проводниками к их радиусу гораздо больше восьми. Расчеты, проведенные с помощью программного пакета Mathcad 6.0, показали, что максимальная эффективность таких экранов в диапазоне 0,1-1000 МГц не превышает 60 дБ и уменьшается до уровня 20 дБ на частоте 1 ГГц. Результат теоретической оценки не учитывает всю совокупность факторов, ухудшающих характеристики экрана, но по общим закономерностям подтверждается экспериментальными данными.

Таким образом, применение трикотажных экранов с сетчатой проводящей структурой ограничено диапазоном рабочих частот.

6.3. Формирование электромагнитных экранов нанесением порошковых материалов на трикотажные полотна

Технология получения композитных материалов фиксацией порошка в термопластичном связующем известна и широко применяется для создания радиопоглощающих материалов. Использование закрепления металлического или магнитного порошка в гибком легкоплавком полимерном клее между слоями трикотажа представляется перспективным для создания гибких поглотителей ЭМИ.

Наиболее доступными и недорогими порошковыми материалами, применяемыми в композитных радиопоглотителях, являются железо и никель, поэтому для гибких конструкций используются микродисперсный абразивный железный порошок ПЖРВ-3 со средним размером частиц около 3 мкм и порошок никеля (1 мкм). Склеивание трикотажных полотен осуществляется серийно выпускаемыми порошковыми легкоплавкими материалами СЭВ 11507-070 и СЭВ 11808-340 с температурой дублирования 120-130°C и 100-110°C, соответственно.

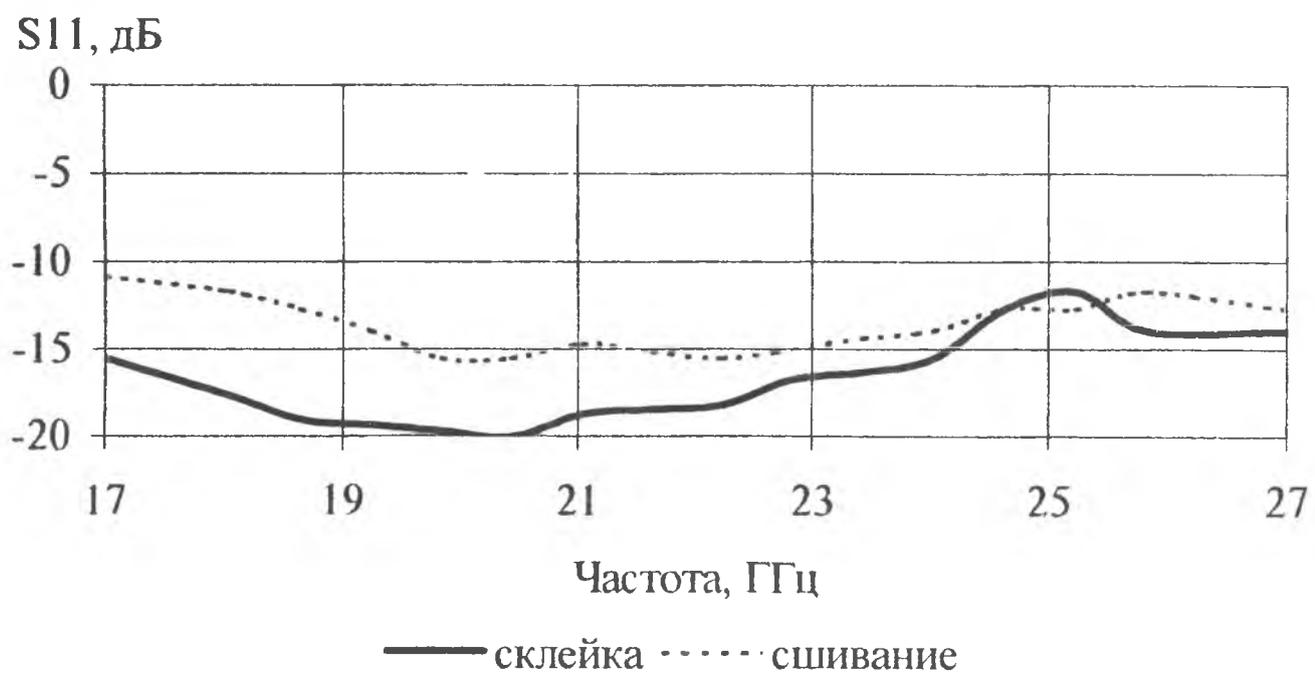
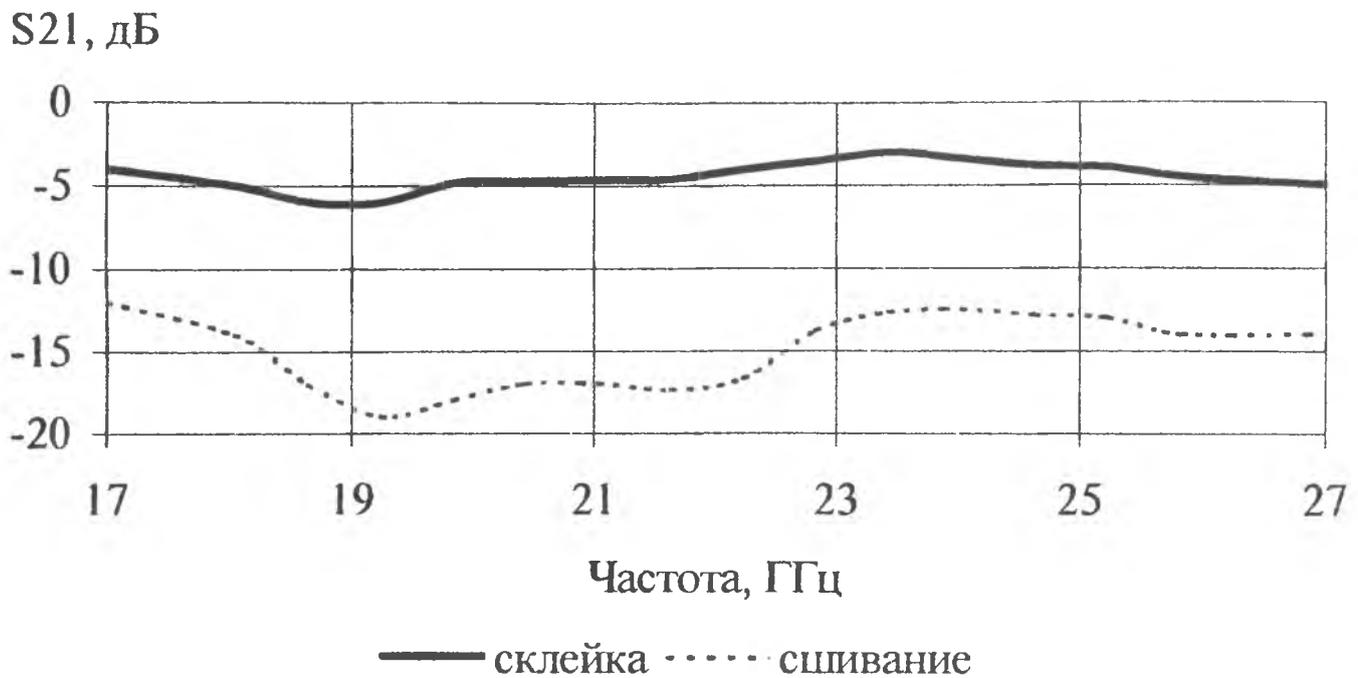


Рис. 6.44. Зависимость экранирующих свойств многослойного трикотажного экрана от способа соединения отдельных слоев

Нанесение клеевого и металлического порошка производится послойно (клей-металл-клей) или совместно при условии равномерного распределения порошка по всей поверхности отрезка полотна экспериментального образца. Порошковые наполнители закрепляются между трикотажными полотнами из полиэфира (пряжа линейной плотности 5 текс), связанными переплетением гладь на машине 21 класса. Массовая доля металлического порошка не должна превышать 50

% от массы полимера. При увеличении содержания порошка металла наблюдается плохая адгезия слоев между собой, высыпание избытка порошка и расслоение конструкции. Адгезия слоев улучшается по мере уменьшения содержания металла.

Склеивание полотен производится термообработкой при температуре 130°C под давлением 5 кг/см². Минимально необходимое время обработки лимитируется процессом плавления полимерной составляющей, длительность процесса термообработки влияет на адгезию полотен и составляет 3 с для слоя толщиной 1 мм. При формировании слоев, толщиной более 1 мм, время обработки необходимо увеличивать.

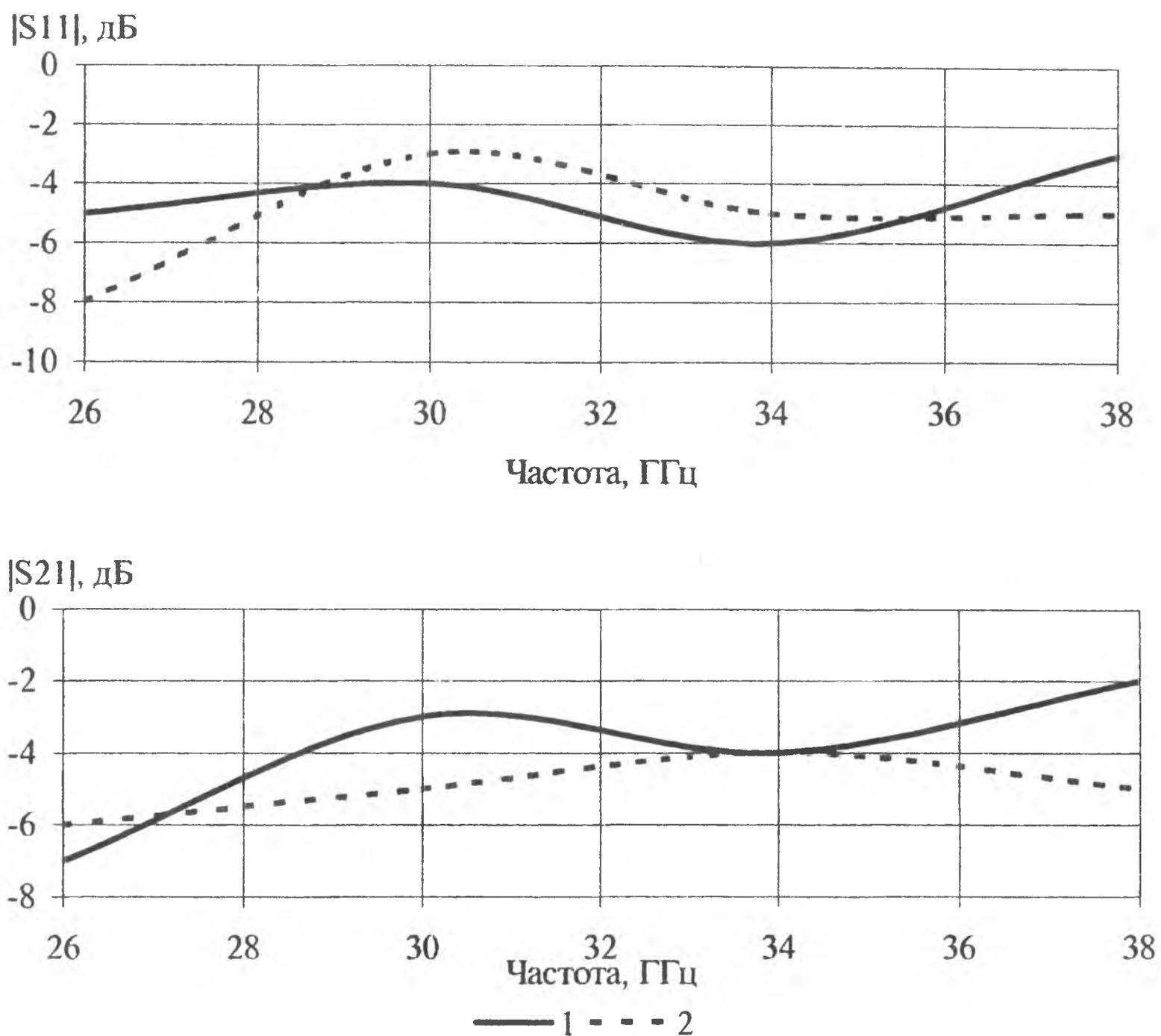


Рис. 6.45. Характеристики композитных материалов на основе порошка никеля (1) и железа (2)

Исследование экранирующих свойств композитных материалов, полученных между тонкими трикотажными полотнами, проводили в частотном диапазоне 26-37 ГГц на векторном анализаторе цепей. Экспериментальные образцы представляли собой два отрезка уплотненного трикотажного полотна, между которыми закрепляется металлический порошок с помощью легкоплавкого клея

СЭВ 11507-070. Соотношение металла и полимера составляло 1:2 по массе, толщина сформированного слоя – 0,9 мм.

Заметного различия в амплитудно-частотных характеристиках модуля коэффициента передачи и отражения для никелевого и железного порошков отмечено не было (рис. 6.45). Материалы обладают низкой эффективностью экранирования на уровне 5 дБ и коэффициентом отражения не менее –5 дБ, что ограничивает их применение в качестве радиопоглощающих, однако композиционные слои перспективны для повышения эффективности гибких экранирующих конструкций. Низкая эффективность однослойной конструкции связана с малой толщиной сформированного слоя и низкой магнитной проницаемостью металлического порошка. Увеличение же толщины композиционного слоя приводит к неоправданному расходу клевого материала, увеличению массы конструкции и ухудшению других конструктивных параметров (уменьшению гибкости).

6.4. Влияние на эффективность экранирования жидких сред, зафиксированных в трикотажных полотнах

В процессе эксплуатации экраны и особенно маскирующие материалы подвергаются воздействию внешних факторов, одним из которых является влажность. Изучение влияния водных и растворных наполнителей представляется особенно интересным, так как вода, например, сама по себе является хорошим поглотителем энергии ЭМИ, однако ее применение ограничено конструктивными сложностями, связанными с теплоотводом и фиксацией жидкости в определенном объеме. Кроме того, вода является составляющей живых организмов, клеток растений, животных, человека, и даже малые дозы ЭМИ вызывают изменения в физиологических процессах, протекающих в биосфере [343].

Для исследования влияния жидкого наполнителя использовалось фильтровальное машинно-вязаное полотно с низким гидросопротивлением и высокой гигроскопичностью, имеющее сложное строение (рис. 6.46).

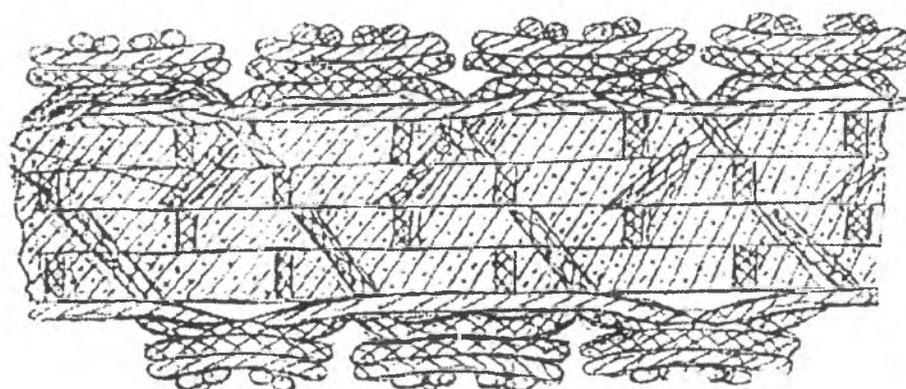


Рис. 6.46. Строение объемного полотна

Структуру волокнистой матрицы можно рассматривать как многослойную, наружные слои которой представляют собой машинно-вязаные полотна одинаковой плотности, состоящие из петель, высокая частота и плотность расположения

которых создают гладкие, равномерно заполненные слои, обеспечивающие высокую устойчивость к механическим воздействиям и хорошо пропускающие жидкость внутрь полотна. Внутренние слои представляют собой системы параллельно расположенных нитей, плотно уложенных друг к другу и строго ориентированных в пространстве за счет протяжек, соединяющих наружные лобовые слои. В качестве материала волокон для лобовых слоев использовали наиболее прочные полиамидные нити. Для создания внутренней пористой структуры применялись синтетические нити из полиакрилонитрила.

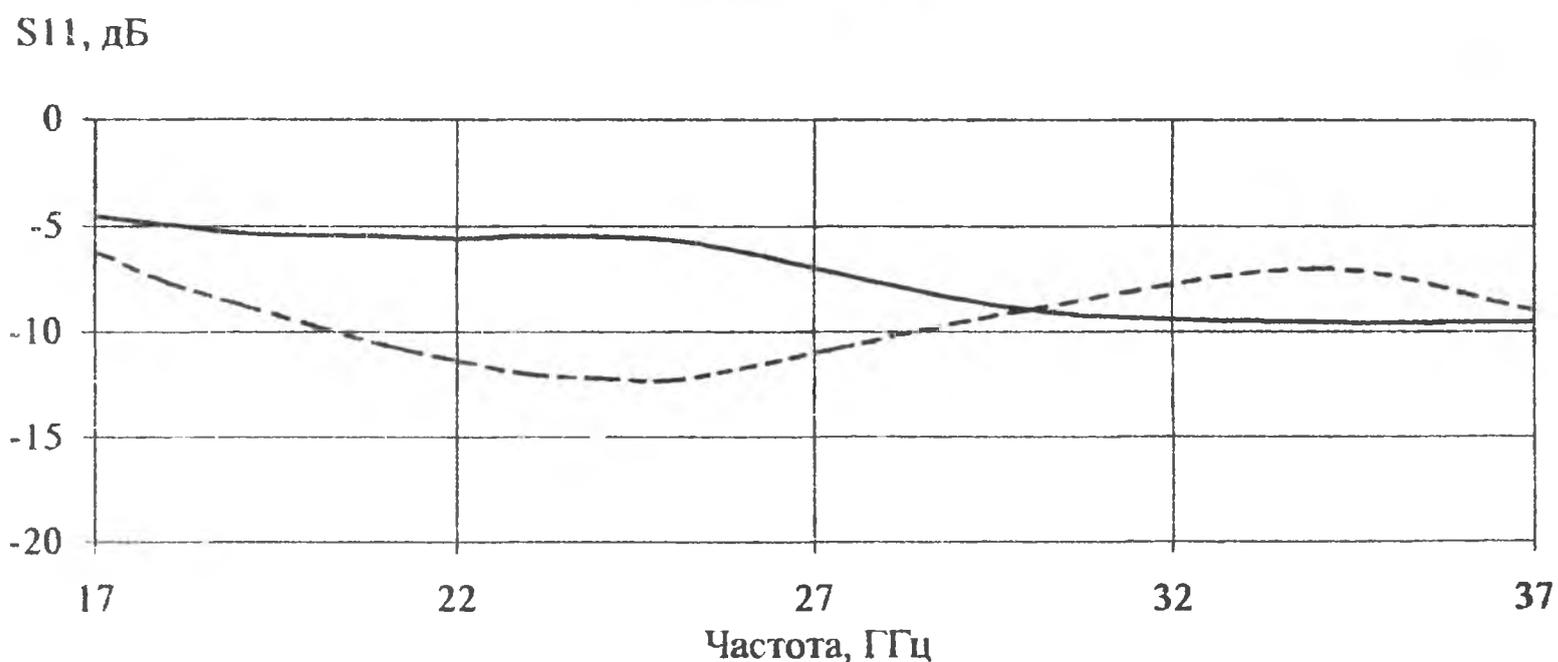
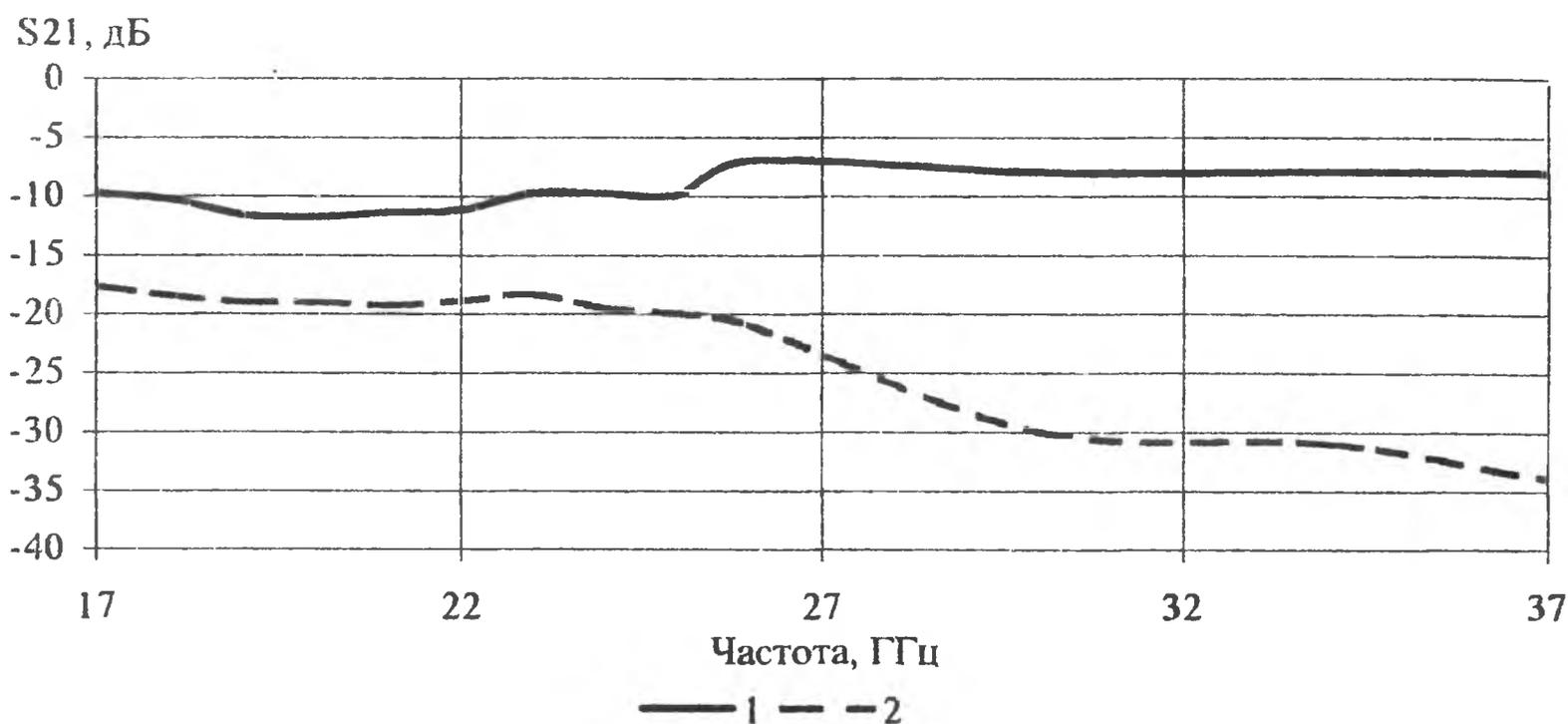


Рис. 6.47. Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения полотен с нанесенным слоем никеля: 1 — сухой образец, 2 — образец, пропитанный водопроводной водой

Изучено взаимодействие электромагнитных волн с машинно-вязаными полотнами комбинированных видов переплетений, пропитанными дистиллированной и водопроводной водой, а также влияние пропитки на экранирующие свойства трикотажных полотен, на лицевую сторону которых

методом вакуумного распыления был нанесён слой металлического никеля (рис. 6.47 и 6.48). Исследования проводились в диапазоне 17-37 ГГц с использованием векторных анализаторов цепей.

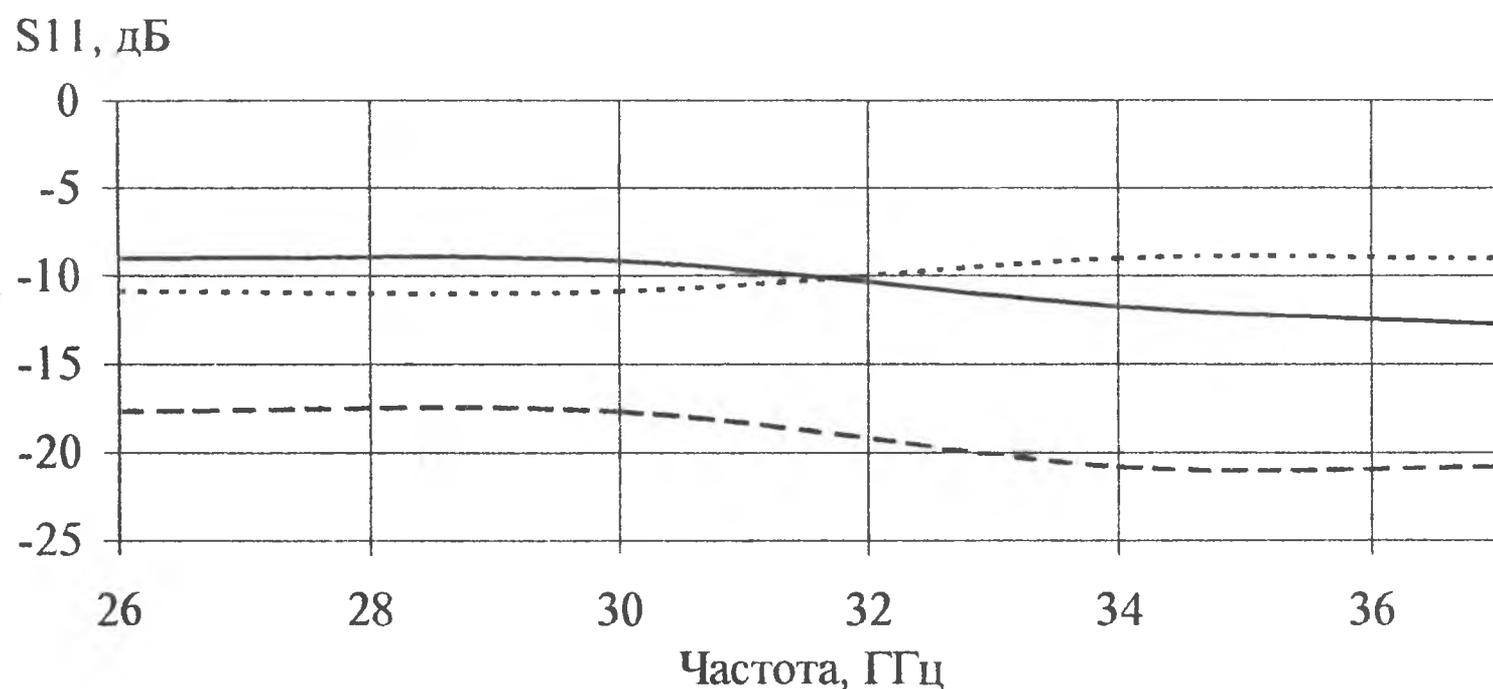
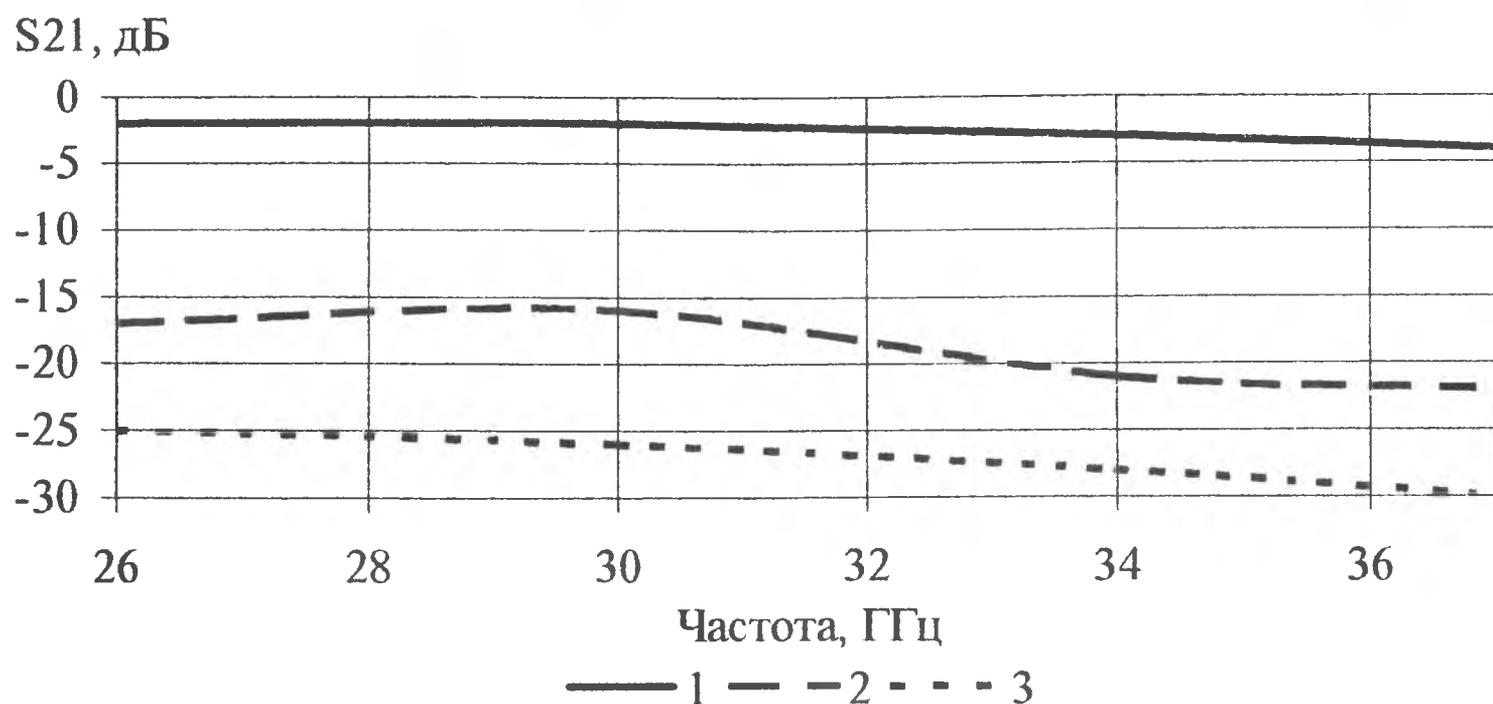


Рис. 6.48. Амплитудно-частотные характеристики коэффициентов передачи и отражения полотен: 1 - сухой образец. 2 – образец, пропитанный дистиллированной водой, 3 - образец, пропитанный водопроводной водой

Результаты измерений, представленные в децибелах, усреднены по всему частотному диапазону. Результаты проведенных измерений показывают перспективность использования пропитанных в жидких средах волокнистых пористых материалов для поглощения ЭМИ СВЧ диапазона. Пропитывание гибких экранов водой увеличивает их эффективность на 10-20 дБ при незначительном изменении коэффициента отражения в случае использования полотен с никелевым покрытием [344]. При пропитке водопроводной водой, которая обладает более высокой электропроводностью по сравнению с дистиллированной, увеличение абсолютной величины коэффициента передачи происходит из-за дополнительного

поглощения ЭМВ в материале за счет потерь на проводимость. Таким образом, использование пропитки водой волокон трикотажного экрана увеличивает количество поглощаемой в материале энергии ЭМИ и практически не влияет на отражающие свойства материала [345].

Машинно-вязаные полотна, пропитанные водой, обеспечивают затухание ЭМИ до 25 дБ, причем поглощающие свойства дистиллированной воды лучше по сравнению с водопроводной, отражение от которой обусловлено ее проводимостью.

6.5 Экранирующие свойства жестких конструкции экранов электромагнитного излучения с жидкостными наполнителями*

Для проведения исследований были изготовлены из органического стекла объемные плоские конструкции экранов ЭМИ толщиной 6 мм. На внутренней поверхности одной из плоскостей были сформированы геометрические неоднородности псевдопирамидальной формы (рис. 6.49). Выполнены неоднородности путем склеивания двух пластин из органического стекла толщиной 1 мм. Размер нижней пластины составляет 5x5 мм, а размер верхней – 3x3 мм, в результате чего высота неоднородностей достигает значения 2 мм. Неоднородности расположены в шахматном порядке, расстояние между их центрами составляет 10 мм. Таким образом, за счет такой конструкции может быть достигнута псевдопирамидальная форма поверхности используемого наполнителя. Внутренняя поверхность второй конструкции - гладкая (рис. 6.50).

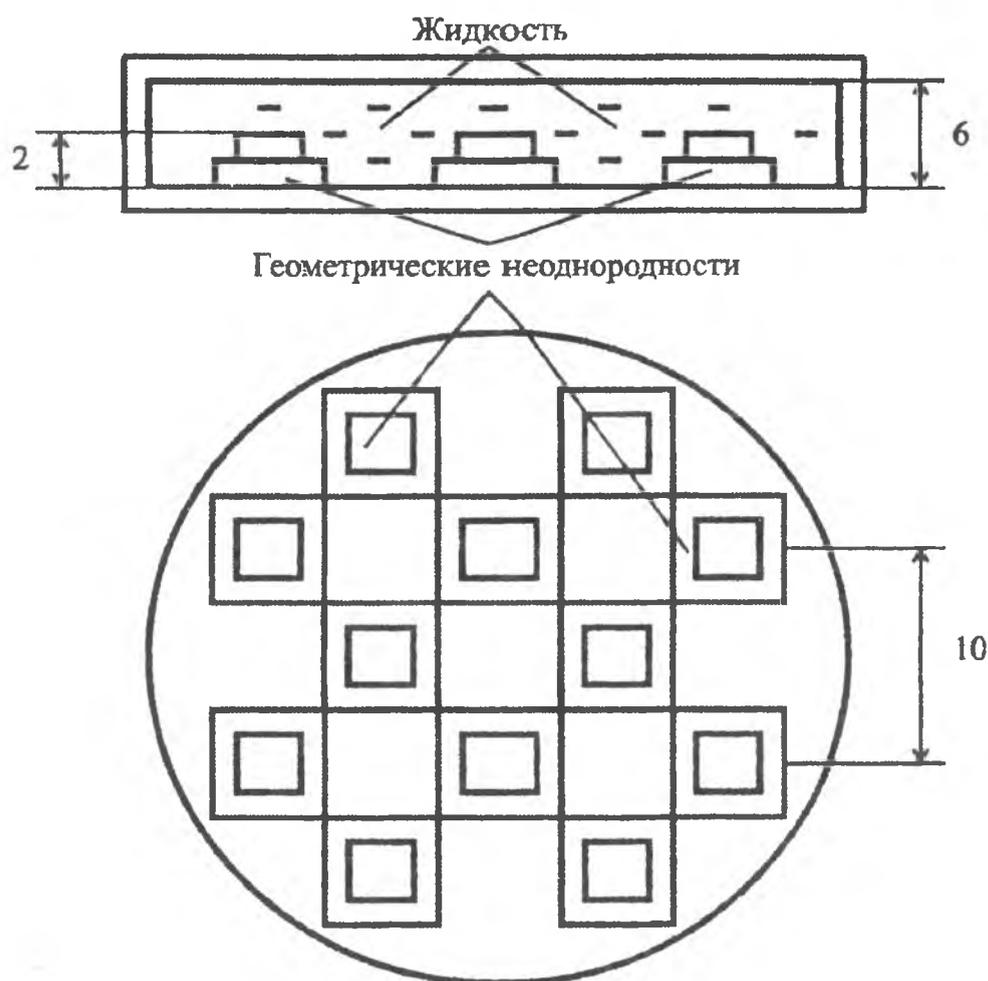


Рис. 6.49. Схематическое изображение жесткой конструкции поглотителя ЭМИ с геометрическими неоднородностями, заполненной жидкостью

* Пункт 6.5 написан совместно с Колбун Н.В.



Рис. 6.50. Схематическое изображение жесткой конструкции поглотителя ЭМИ с гладкой внутренней поверхностью, заполненной жидкостью

Измерения коэффициента ослабления и коэффициента отражения проводились в частотных диапазонах 27-36 ГГц и 80-115 ГГц. В качестве измерительной аппаратуры в диапазоне частот 27-36 ГГц использовался измеритель КСВН панорамный Р2-65 (ГКЧ), а в диапазоне частот 80-115 ГГц - генератор РГ4-14. В обоих частотных диапазонах был задействован блок индикаторный Я2Р-70 и волноводная измерительная линия с двумя рупорными антеннами. Вначале производилась калибровка измерительного оборудования, после чего исследуемый образец помещался между рупорами антенн.

При измерении экранирующих характеристик случайная составляющая не оценивалась, доверительный интервал - 1 дБ, вероятность - 0,95. Погрешность измерения приборов составляла для Р2-65: $\pm(0,5 + 0,05A)$, для комплекса РГ4-14 и Я2Р-70: $\pm(0,6 + 0,06A)$.

В процессе исследований экспериментально установлено наличие локального уменьшения коэффициента отражения до значения 8 дБ на частотах 30 и 97 ГГц для экранов с гладкой поверхностью (рис. 6.51). Формирование геометрических неоднородностей высотой 2 мм, расположенных в шахматном порядке с расстоянием 10 мм между их центрами снижает коэффициент отражения до величины 26 дБ на этих частотах.

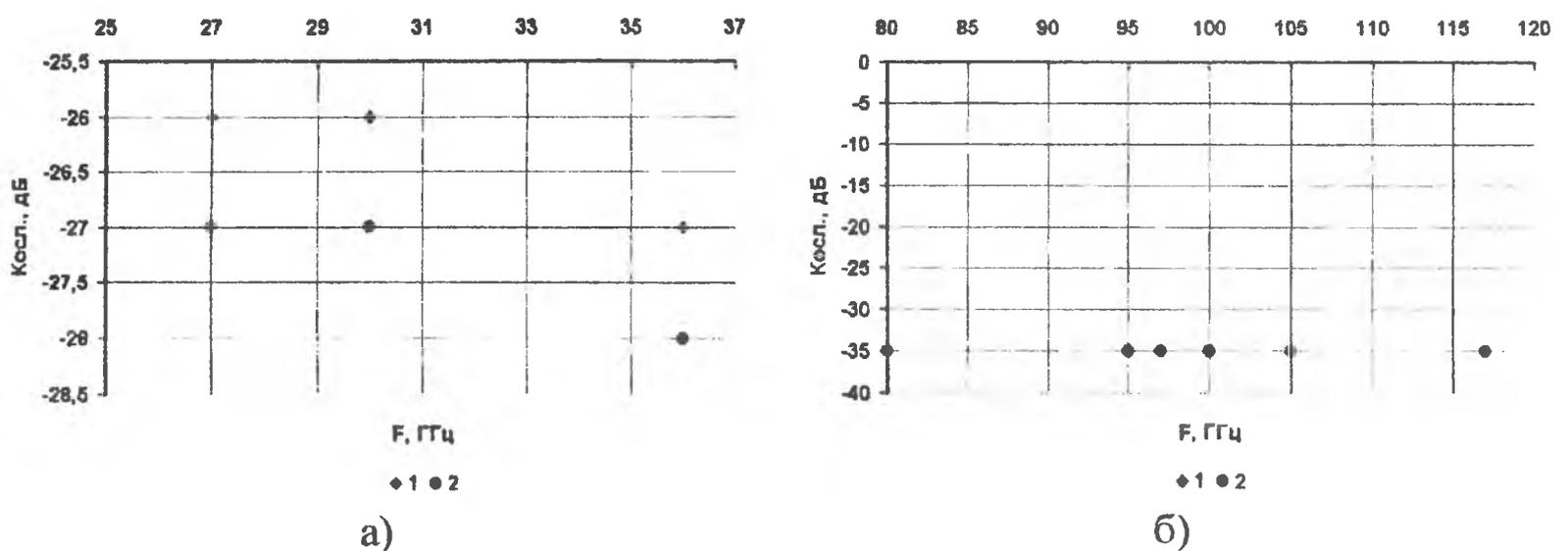


Рис. 6.51. Зависимость коэффициента ослабления воды от частоты:
1 - наполнитель с гладкой поверхностью, 2 - наполнитель с поверхностью псевдопирамидальной формы

Использование различных составов растворных наполнителей позволяют регулировать значение коэффициента отражения для конструкций с геометрическими неоднородностями в пределах 10÷26 дБ, а для конструкций с гладкой поверхностью в диапазоне 8÷16 дБ.

Установлено, что наличие геометрических неоднородностей на поверхности жидкостных наполнителей на величину коэффициента ослабления значительного влияния не оказывает (рис. 6.52). Увеличить коэффициент ослабления (более 35 дБ) возможно путем применения растворного наполнителя в качестве, которого могут быть использованы водные растворы NaCl и этиленгликоля. Увеличение ослабления происходит за счет потерь на проводимость [346].

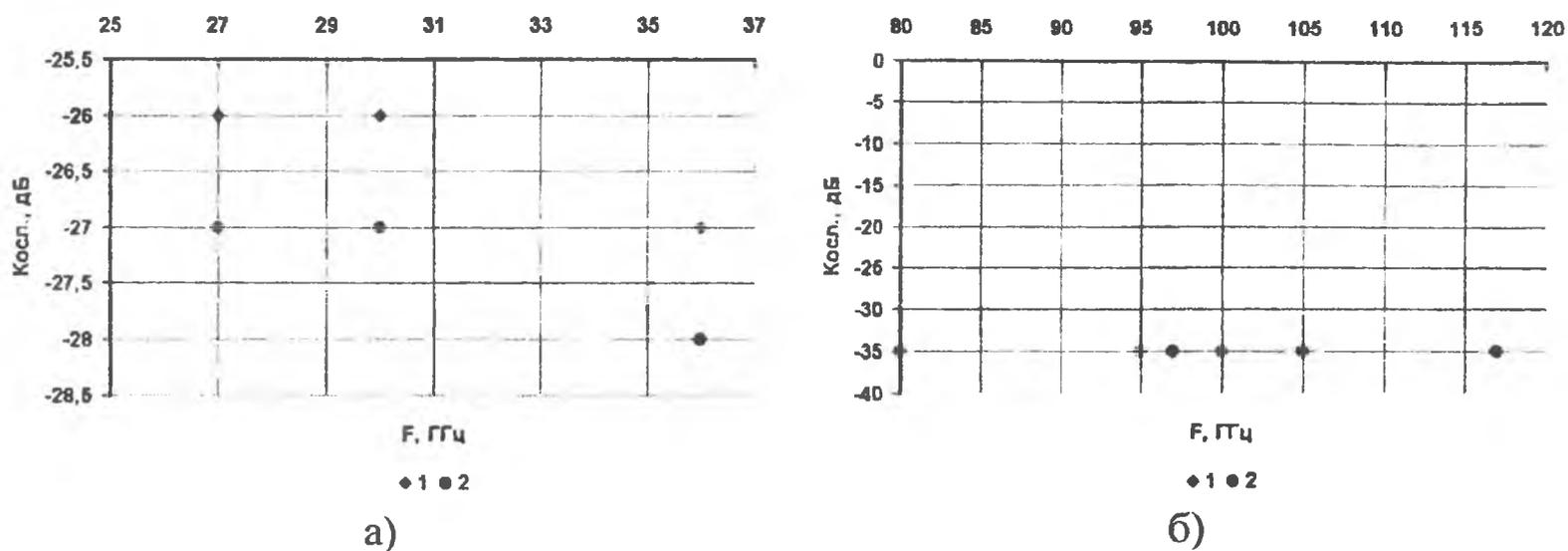


Рис. 6.52. Зависимость коэффициента ослабления воды от частоты:
1 - наполнитель с гладкой поверхностью, 2 – наполнитель с поверхностью псевдопирамидальной формы

Наличие локального уменьшения коэффициента отражения на частотах 30 и 97 ГГц объясняется СПЕ-эффектом [347, 348]. Впервые этот эффект был обнаружен и исследован в 1998 г. Синицыным Н.И., Петросяном В.И., Елкиным В.А. и назван по первым буквам их фамилий. Он заключается в объемном резонансном взаимодействии электромагнитных волн миллиметрового диапазона с биологическими средами и водой. Эффект был охарактеризован как явление изменения теплового радиоизлучения организма человека, воды или водосодержащих систем в дециметровом диапазоне длин волн под действием зондирующего низкоинтенсивного излучения в миллиметровом диапазоне.

7. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ЭКРАНИРУЮЩИХ И РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Основными направлениями разработок экранов и радиопоглотителей являются синтез новых радиопоглощающих материалов и применение их в конструкциях РЭС, создание композитов с необходимыми электрофизическими характеристиками, применение упорядоченных структур с градиентом электрических и магнитных свойств. Одним из способов создания эффективных радиопоглощающих материалов является использование ультрадисперсных материалов (УДМ) и создание нанокристаллической структуры в полимерной матрице.

УДМ являются новым классом материалов, структура и свойства которых зависят от размера морфологических элементов – малых частиц или кристаллитов [349]. Поэтому с уменьшением размера кристаллитов постепенно изменяется структура и свойства материала и появляются скачкообразные размерные эффекты [350]. Это происходит из-за влияния большой удельной поверхности и за счет соизмеримости кристаллитов с фундаментальными физическими величинами (длиной свободного пробега электронов или фотонов, размером электрического или магнитного домена, протяженностью дислокации или дисклинации). По характеру распределения атомной плотности ультрадисперсные материалы относятся к промежуточному типу (между кристаллическим и аморфным). Механические свойства таких материалов изменяются в сторону повышения твердости в сочетании с высокой пластичностью, увеличения предела текучести. Для малых металлических частиц характерным является полупроводниковый характер электрической проводимости.

Известны физические и химические способы получения УДМ. Аморфные металлические частицы получают механическим измельчением аморфных лент (размеры частиц около 100 мкм), электроискровым диспергированием (0,01-10 мкм), методом импульсного плазменного канала, химическим осаждением (0,005-0,02 мкм), электроконденсационным, плазмохимическим, электровзрывным, термолизным, пиролизным и другими способами. Общим необходимым условием является сочетание высокой скорости зарождения частиц с малой скоростью их роста. Существующие методы синтеза наноразмерных частиц можно разделить на три основные группы [351]:

1. Химическое осаждение из растворов солей.
2. Формирование в результате фазового перехода.
3. Аэрозольный метод.

Наиболее простыми, технологичными и благоприятными с точки зрения фиксации ультрадисперсных неорганических частиц в волокнистой полимерной матрице являются методы, основанные на химическом восстановлении

* Глава 7 написана совместно с д.х.н. Глыбиным В.П.

сорбированных ионов металлов и позволяющие путем последовательных ионообменных реакций получать материалы, проводимость, диэлектрическая и магнитная проницаемость которых зависит от технологии синтеза.

В данной работе выбраны и использованы методы химической металлизации волокнистых диэлектриков для изменения физических и химических свойств материалов.

7.1. Химическое модифицирование волокнистых материалов

Для создания гибких экранов и радиопоглотителей перспективными являются трикотажные технологии с использованием радиопоглощающих волокнистых материалов, синтез которых возможен на основе изготавливаемых в настоящее время волокон, подвергнутых различным модификациям [352]. Применяемые в настоящее время в легкой промышленности волокна характеризуются различным химическим составом, структурой, физико-химическими свойствами.

7.1.1. Физико-химические свойства волокнистых материалов

Для производства трикотажных полотен и нетканых материалов применяют волокна, разделяемые на две группы: натуральные и химические. К натуральным волокнам относятся лен, хлопок и шерсть. К химическим – искусственные (вискозные, ацетатные, триацетатные, металлические) и синтетические (капрон, анид, лавсан, нитрон, хлорин, поливинилхлорид, виол, пропилен и др.) Отдельно можно выделить металлические нити (люрекс, алюнит), получаемые из алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм путем разрезания ее на узкие полоски шириной 0,2-1,6 мм или из металлизированной полиэфирной пленки.

Синтетические волокна получают синтезом из продуктов нефтехимии, например, из ацетиленов и синильной кислоты (полиакрилонитрильные); фенола, бензола, толуола, циклогексана (капрон, полипропилен); винилхлорида (поливинилхлорид) и т.д.

Среди различных типов волокон целлюлозные отличаются высокой степенью полимеризации и наличием различных функциональных групп, что определяет их механические, химические свойства, а также гигроскопичность [353, 354]. В зрелом хлопковом волокне целлюлоза составляет 94-96 %, остальные примеси - природные спутники целлюлозы. В текстильной промышленности в ассортименте хлопкового волокна доля тонковолокнистого хлопка составляет около 14 %, средневолокнистого - около 86 %.

Гидратцеллюлозные вискозные волокна получают из регенерированной целлюлозы путем переработки древесной целлюлозы или отходов хлопка. Гидратцеллюлоза является структурной модификацией природной целлюлозы, имеет значительно меньшую степень полимеризации и, следовательно, меньшую длину молекулярных цепей и различную ориентацию макромолекул в волокне.

Для формирования трикотажных экранов наиболее перспективными являются материалы, сочетающие улучшенные механические и эксплуатационные характеристики и пониженную стоимость с простотой модификации и возможностью создания на их основе волокнистых композитов. С этой точки зрения необходимо более подробно рассмотреть волокна, в составе молекул которых уже имеются реакционноспособные группы.

Наиболее стойкими к химическим воздействиям из природных волокон являются волокна льна. Это объясняется их высокой степенью кристалличности. Затем идут в порядке уменьшения химической стабильности хлопок и вискоза. При воздействии кислот первоначально гидролизующему действию подвергаются глюкозидные связи участков макромолекул, находящихся в аморфных областях. На последующих стадиях процесса гидролиза действию кислоты подвергаются только глюкозидные связи, находящиеся на концах кристаллитов целлюлозы. Скорость гидролиза на этой стадии процесса резко уменьшается [355]. Использование искусственных целлюлозных волокон является более предпочтительным с точки зрения их невысокой стоимости, но они уступают натуральным льну и хлопку по механическим характеристикам.

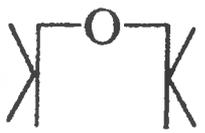
Среди синтетических волокон наибольшей химической стойкостью обладают полиэфирные волокна. Однако они мало пригодны для использования в качестве подложки для химического осаждения наночастиц металлов, так как не содержат реакционноспособных функциональных групп. Основной недостаток полиамидных волокон - растворимость в кислотах. Большой интерес могли бы представить поливинилспиртовые волокна, выпускаемые в России под названием винол, в США - под названием винал. Для придания им полной нерастворимости в кипящей воде их подвергают ацетилированию формальдегидом. При этом в кислых растворах происходит раскрытие образовавшихся ацетальных связей [356]. Если будет разработан простой способ, позволяющий существенно увеличить их кислотостойкость, то эти волокна можно будет с успехом использовать как основу для осаждения благодаря большой концентрации гидроксильных групп в структуре полимера.

Широко используются полиакрилонитрильные (ПАН) и целлюлозные волокна. ПАН волокна выпускаются во многих странах под следующими названиями: орлон, акрилан, креслан (США), акрилон (Франция), редон, ПАН (Германия), куртель (Англия), кашмилон (Япония). Эти волокна устойчивы в разбавленных и средней концентрации растворах кислот, разбавленных растворах щелочей. Они содержат CN-группы, способные к полимераналогичным превращениям. В частности, на их основе разработаны хемосорбционные волокна марок ВИОН КН-1 и ВИОН АН-1. Волокна ВИОН КН-1 получают в две стадии: на первой стадии путем обработки волокон ПАН раствором гидразина создают трехмерную пространственную сетку, а на второй стадии проводят омыление нитрильных групп до карбоксильных.

По своему значению полиакрилонитрильные волокна и нити занимают третье место среди синтетических волокон и нитей, объем в мировом производстве составляет свыше 2 млн т. Полиакрилонитрильные текстильные материалы производят из полиакрилонитрила (ПАН), а также из различных сополимеров акрилонитрила с небольшим количеством (до 15 %) других мономеров в основном в виде штапельного волокна. В странах СНГ полиакрилонитрил вырабатывают с линейной плотностью 0,5 и 0,67 текс. Комплексные нити выпускают линейной плотности 29 текс из 200 элементарных нитей. Физико-механические свойства волокон представлены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Физико-механические свойства волокон

| Волокно | Целлюлозное (хлопок) | Гидратцеллюлоз ос: вискозное, штапельное, высокомодульное, филаментное | Полиакрилонитри льное (нитрон) |
|---|-------------------------|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Формула элементарного звена полимера | $(C_6H_{10}O_5)_n$ | $(C_6H_{10}O_5)_n$ $(C_6H_{10}O_5)_n$ | $\left[-CH_2-\underset{\substack{ \\ CN}}{CH}- \right]_n$ |
| Функциональные группы и связи, определяющие химические свойства волокна | - OH |  | - COOH у сополимера |
| Влажность при норм. условиях, % | 7-8 | 11-13,9 | 0,8-1 |
| Температура плавления или деструкции, °С | - | - | 232-238 |
| Температура размягчения, °С | - | - | 200-210 |
| Плотность, г/см ³ | 1,5 | 1,52 | 1,3 |
| Предел прочности при растяжении, % | 33 | 13 | - |
| Электрическое сопротивление, Ом | 10^7 | 10^8 | 10^{14} |
| Диаметр поперечного сечения волокна, мкм | 15-25 | 15-60 | 15-60 |
| Толщина волокна, мтекс | 222-125 | 666-166 | 833-166 |
| Длина волокна, мм | 25-45 | 34-120 | 33-95 |
| Теплостойкость, °С | 130-140 | 140-150 | 160-170 |
| Гигроскопичность, % | 7-9 | 11-13 | 1 |
| Прочность волокон | кг/мм ² | 35-56 | 20-35 |
| | км | 24-38 | 15-20 |
| | | | 27-35 |
| | | | 23-30 |

| 1 | | 2 | 3 | 4 |
|---|--------|-----------|-----------|-----------|
| Разрывное удлинение волокна, % | сухое | 7-8 | 18-26 | 20-26 |
| | мокрое | 8-10 | 21-30 | 25-31 |
| Стойкость к истиранию относительно капрона, % | | 10-12 | 10-2 | 4-2 |
| Линейная плотность, текс | | 0,13-0,22 | 0,2-0,7 | 0,3-0,7 |
| Показатель толщины, мм ² | | 0,09-0,15 | 0,13-0,47 | 0,25-0,58 |

Свойства волокон могут заметно изменяться при воздействии воды, кислых и щелочных сред, а также других внешних воздействий [357].

Действие воды. При погружении в воду все целлюлозные волокна, в том числе хлопок, набухают, их поперечные размеры увеличиваются на 40-50 % в результате взаимодействия молекул воды, проникающих внутрь волокна, с макромолекулами целлюлозы. Прочность хлопка при этом увеличивается. Вискозные волокна обладают большой гигроскопичностью. В воде быстро набухают и в мокром состоянии теряют 40-50 % своей механической прочности. Полиакрилонитрильные волокна, относящиеся к карбоцепным волокнам, гидрофобные, в воде почти не набухают, обладают низкой гигроскопичностью.

Действие кислот. К действию кислот целлюлоза неустойчива. В растворах кислот происходит гидролиз макромолекул целлюлозы по глюкозидным связям. Степень полимеризации снижается и образуется смесь продуктов гидролиза с различной степенью полимеризации. Это сопровождается значительным ухудшением прочности волокна вплоть до приобретения им хрупкости и рассыпания в порошок при механических воздействиях. Скорость протекания гидролиза зависит от природы и концентрации кислоты, температуры и продолжительности воздействия. Минеральные кислоты разрушают целлюлозу значительно быстрее, чем органические, при повышении температуры и увеличении концентрации кислоты скорость реакции гидролиза возрастает [358].

Концентрированные кислоты растворяют целлюлозные волокна при нормальной температуре, кислоты средней концентрации растворяют целлюлозу при нагревании. Слабые растворы кислот понижают прочность целлюлозных волокон, особенно искусственных. При нагревании разрушение целлюлозы идет более интенсивно. Органические кислоты на хлопок и искусственные целлюлозные волокна вредного воздействия не оказывают.

Полиакрилонитрильные волокна обладают высокой устойчивостью к действию кислот средней концентрации при повышенной температуре и даже к действию концентрированных растворов органических и неорганических кислот (кроме серной и азотной). Концентрированные кислоты, как правило, сильно повреждают волокна, например, при обработке волокна концентрированной серной или азотной кислотой происходит его растворение при комнатной температуре.

Влияние щелочей. К действию щелочей целлюлоза устойчива. При обработке растворами щелочей концентрации более 10 % происходят как физико-химические изменения, так и химическое взаимодействие щелочи с целлюлозой. В результате последующего промывания водой образуется целлюлоза с тем же химическим составом, но несколько отличающимися физико-химическими свойствами и строением (гидратцеллюлоза). В результате это волокно становится более гигроскопичным, рыхлым, лучше окрашивается. При определенных условиях обработки приобретает блеск.

ПАН волокна малоустойчивы к действию щелочей. Нитрон растворяется в концентрированной щелочи в нормальных условиях. Разбавленные щелочи при сравнительно кратковременном воздействии не производят существенного повреждения волокон. Однако длительный контакт может привести к значительным повреждениям и разложению волокна, особенно при повышенной температуре.

Действие окислителей и восстановителей. Окислители (гипохлорит натрия, пероксид водорода, обработку которыми проводят в процессе беления для обесцвечивания природных красящих веществ) окисляют как целлюлозу, так и гидратцеллюлозу. В зависимости от среды, условий обработки и типа окислителя реакция окисления может протекать по-разному с различной степенью окисления. При этом происходит снижение степени полимеризации и вследствие этого уменьшение механической прочности волокна. Эти виды волокон особенно чувствительны к действию окислителей в щелочной среде.

В отличие от окислителей восстановители, например, гидросульфит натрия (NaHSO_3), ронгалит, сернистый натрий (Na_2S), дитионит натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) не оказывают деструктирующего действия на целлюлозу и практически не изменяют ее свойств. Аналогична реакция и вязкозных волокон. ПАН волокна к действию восстановителей и окислителей устойчивы.

Влияние органических растворителей. В органических растворителях (хлорированных углеводородах, применяющихся для химической чистки, спиртах, эфире, бензоле, ацетоне и т.д.) целлюлоза не растворяется. Она растворима лишь в водных растворах комплексных соединений гидроксидов некоторых металлов с аммиаком или аминами, например в медно-аммиачном растворе $[\text{Cu}(\text{NH}_3)](\text{OH})_2$, кадаксене и др. ПАН волокна при воздействии даже в течение продолжительного времени (многих часов) распространенных органических растворителей, таких, как ацетон, бензол, эфир, этиловый спирт, хлороформ и др., при комнатной температуре не изменяют своей прочности. Однако они растворяются в сильнополярных органических растворителях в феноле, м-крезоле, диметилсульфоксиде, диметилформамиде (он используется в качестве растворителя при производстве волокна). Нитрон легко растворяется в кипящих диметилформамиде, диоксане, этиленкарбонате, хлорацетонитриле, нитрометане, пропиолактоне.

Влияние термических воздействий, света и атмосферных условий. Устойчивость целлюлозы к термическим воздействиям зависит от температуры и продолжительности обработки. При температуре 100°C даже в течение

продолжительного времени целлюлоза практически не изменяет своих свойств. При увеличении продолжительности и повышении температуры обработки происходит термическая деструкция целлюлозы (табл. 7.1). При внесении в пламя целлюлоза быстро сгорает — образуется легкий серый пепел. К действию света и атмосферным условиям целлюлоза неустойчива. Одновременное воздействие света, влаги и кислорода воздуха приводит к фотодеструкции целлюлозы вследствие ее фотохимического окисления кислородом воздуха и образования оксигеллюлозы.

Полиакрилонитрильные волокна обладают высокой термо- и светостойкостью, а также устойчивостью к атмосферным воздействиям. Нитрон особо устойчив к ядерным излучениям (в 4 раза выше, чем у вискозных).

По доступности и ценовым характеристикам волокна полиакрилонитрила и целлюлозы доступны. В Республике Беларусь ПАН производят в г. Пинске и г. Новополоцке, также развито производство искусственных волокон, при этом ПАН является одним из наиболее дешевых волокнистых материалов.

7.1.2. Характеристика методов модифицирования материалов

Для изменения свойств материалов возможно видоизменить технологию синтеза исходных полимеров, ввести дополнительные стадии обработки и компоненты или использовать модифицирование уже существующих волокон. Электропроводящие свойства могут быть улучшены добавлением сажи в материал, протягиваемый через фильеры при производстве волокна [359]. Модифицирование может производиться как физическими (например, облучение жестким рентгеновским излучением), так и химическими способами.

Среди химических методов модифицирования можно выделить окисление, карбонизацию, полимераналогичные превращения [360], а также модификацию путем прививки функциональных групп (прививка может быть радиационная, каталитическая и т.д.). Химическое модифицирование материала полимерных волокон осуществляют на основе реакций статистической, блок- и "привитой" сополимеризации (или соконденсации), а также полимераналогичных превращений.

Изменение первичной структуры полимерного субстрата (химического состава элементарного звена) может быть достигнуто реакциями рекомбинационного присоединения. Этот способ химического модифицирования заключается в предварительной сорбции модифицирующего агента волокном или пленкой, находящимися в высокоэластичном состоянии с последующим переводом полимерного субстрата (сорбента) и модификатора (сорбата) в свободно радикальное состояние в результате химического или радиационного инициирования. Последующая рекомбинация частиц, на которых генерированы свободно радикальные центры, приводит к возникновению между ними ковалентной связи. Эта стадия процесса обуславливает фиксацию модифицирующего агента на волокне или пленке даже в случае, если между ними нет химического сродства [361].

Окисление целлюлозных волокон может вызвать образование альдегидных и карбоксильных групп. Это ведет к уменьшению гидролитической стойкости макромолекул. Одним из путей, способных уменьшить деструкцию волокон, является увеличение числа поперечных связей между макромолекулами, а также создание стерических затруднений. Одним из самых простых методов является метод фосфорилирования целлюлозы, приводящий к образованию поперечных – Р-О-Р- связей [362, 363]. Этот способ имеет еще и то преимущество, что при этом часть гидроксильных групп молекул целлюлозы превращается в более реакционноспособные -РО(ОН)₂-группы.

Процесс модифицирования полиакрилонитрила и целлюлозы проводится с целью придания этим волокнам хемосорбционных свойств, чтобы на последующих этапах получить волокнистые материалы, обладающие радиопоглощающими свойствами.

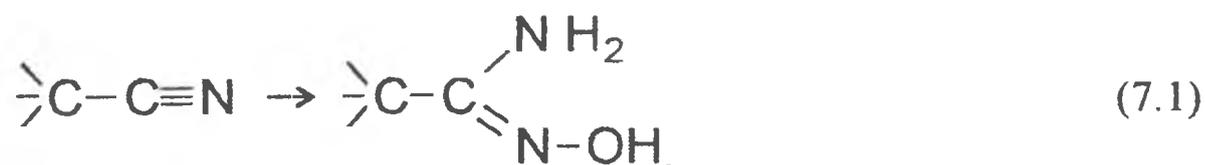
Модифицирование волокон полиакрилонитрила заключается в проведении полимераналогичных реакций с CN-группами вещества. Молекулы полиакрилонитрила не хемосорбируют ионов металлов. Для получения хемосорбционных волокон на основе полиакрилонитрила известны различные способы. Один из способов состоит в обработке волокна нитрон водным раствором гидразингидрата и последующего его омыления. В качестве раствора для получения волокна с трехмерной пространственной сеткой используют 25 %-ные водные растворы гидразингидрата. Обработку волокон ведут при 90⁰С в течение 2 ч. Усадка в 74 %-ной серной кислоте должна составлять при 100⁰С 45-55 %. Усадка является косвенной характеристикой густоты пространственной сетки. Омыление гидразидированного волокна осуществляется с помощью 5-10 %-ного раствора едкого натра. Раствор щелочи предварительно подогревается до 70⁰С. При этой температуре нитрильные группы омыляются и получается содержащее карбоксильные группы волокно. Продолжительность гидролиза составляет 1 ч. Затем его промывают и сушат. Статическая обменная емкость такого волокна составляет около 6 ммоль экв/г. Недостатком такого волокна является низкая механическая прочность его натриевой формы. В водородной форме прочность волокна выше примерно в 2 раза.

Хемосорбционные волокна также получают методом прививочной полимеризации ионогенных мономеров, химического превращения функциональных групп в привитых цепях и радикальной прививочной полимеризации. С помощью этого метода получили волокна состава целлюлоза-ПАН и поликапромид-ПАН (35 % ПАН). Модифицирование ПАН проводили методом превращения нитрильных групп в гидразидиновые [364]. Волокна сначала обрабатываются 6%-ным раствором КОН при модуле Т:Ж, равном 30, в течение 15 мин при температуре 90⁰С. На этой стадии происходит циклизация макромолекул. Затем производится гидрализирование 30 %-ным раствором гидразингидрата при модуле 10, температуре 90⁰С в течение 2 ч. Такое волокно проявляет анионообменные свойства. Статическая

обменная емкость полученных волокон составляет 1,5-2 ммоль эквивалента на грамм по ионам d-элементов.

7.1.3. Химическое модифицирование полиакрилонитрила

Необходимость модифицирования полиакрилонитрильных волокон обусловлена их плохой смачиваемостью, высокой гидрофобностью, что препятствует протеканию реакций осаждения металлов из водных растворов, и низкой способностью к сорбции ионов металлов. Гидрофобность и низкая гигроскопичность материала обуславливается присутствием в элементарном звене полимера $C\equiv N$ групп, модификация которых проводится с помощью реакции оксиаминирования путем деструкции тройных связей в нитрильных группах и преобразования их в двойные по схеме [365, 366]:



Для модифицирования используются волокна, нити и образцы трикотажных полотен из полиакрилонитрила.

Волокна изготавливаются из высокообъемной пряжи линейной плотностью 15,6×2 текс путем ее измельчения. Для исследования механических характеристик используются полиакрилонитрильные нити линейной плотностью 6,6 текс с левой круткой. Нить наматывается с бобины и нарезается на отрезки по 25 см после чего проводится их обработка в одной партии с отбором тестовых образцов после каждой стадии обработки.

Экспериментальные образцы представляли собой фрагменты из трикотажных полотен, связанных из полиакрилонитрильной пряжи 31,2×2 текс комбинированным переплетением ластик-цепочка с ластичной расстановкой на трикотажном кругловязальном трехсистемном чулочно-носочном автомате модели ОЗРН 18 класса со скоростью вращения 220 об/мин. Размеры образцов составляли 150×200 мм, толщина не превышала 1 мм, а масса – около 10 г.

При обработке образцов волокон и нитей в водных средах осуществлялось постоянное перемешивание растворов с волокнами стеклянной мешалкой вручную или с помощью электродвигателя с регулируемой частотой вращения до 300 об/мин. Образцы трикотажного полотна закреплялись на проволочном каркасе спиралевидной формы, покрытом поливинилхлоридным изолирующим чехлом, герметично запаянным с одной стороны для предотвращения контакта материала каркаса с раствором. Мешалка вместе с закрепленным на ней образцом приводилась во вращение двигателем с частотой вращения 120 об/мин.

Процесс подготовки образцов включает отмывку образцов от остатков парафина, используемого для смазки пряжи, чтобы облегчить процесс вязания

трикотажного полотна, и остаточного загрязнения, которое могло возникнуть при вязании. Удаление грязи производится механическим трением в мыльной воде с последующей промывкой водопроводной водой. После чего образцы помещаются в воду и выдерживаются в течение нескольких часов при комнатной температуре.

Модифицирование ПАН волокон проводилось обработкой в водном растворе хлористого или сернокислого гидроксилamina, концентрация которого составляет 0,84 моль/л, в течение 45 мин при температуре 75⁰С, рН составляла около 4. Затем в раствор добавлялось до 1 г гидразингидрата. После обработки в данном растворе проводилось повышение рН раствора до рН=6-7 с помощью Na₂CO₃·10H₂O и выдержка на водяной бане при температуре 65-75⁰С в течение 35-60 мин. Длительность процесса определялась визуально по изменению свойств волокон. При этом волокна незначительно усаживаются, грубеют, приобретают розоватый оттенок, матовую окраску. Оценка кислотности среды проводится с помощью универсальной индикаторной бумаги (рН=1-10 ТУ 6-09-1181-76). Для стабилизации температурного режима производится термостатирование [367].

Следующим этапом является отжимание и отмывка образцов от остатков модифицирующего раствора. Модифицированные волокна многократно отмываются водопроводной теплой, а затем холодной и, наконец, дистиллированной водой.

При проведении экспериментов в лабораторных условиях используется навеска волокон ПАН массой 5 г. Раствор NH₂OH·HCl готовится на водопроводной воде в следующей пропорции: 17,6 г вещества на 300 мл воды. Вместо хлористого гидроксилamina можно использовать NH₂OH·H₂SO₄, масса которого определяется по необходимой концентрации чистого гидроксилamina в растворе.

Особенности процесса химического модифицирования ПАН. В результате исследования модифицирования полиакрилонитрила было определено влияние основных параметров процесса на свойства волокон. Методами химического анализа показано, что количество синтезированных реакционноспособных групп (количественная характеристика степени модифицирования материала) зависит от времени обработки материала и температуры синтеза. При уменьшении температуры происходит замедление реакции, и для достижения такой же степени модифицирования необходимо увеличивать длительность синтеза в течение большего времени, достигающего 4-5 ч, а при уменьшении температуры ниже 50⁰С модифицирование по описанной методике становится невозможным. Повышение температуры и увеличение времени обработки в растворе соды приводит к образованию пространственных "сшивок" за счет объединения атомов углерода из соседних молекул полимера между собой, что выражается в спекании ПАН волокон, превращению их в хрупкую смолу.

Уменьшение концентрации гидроксилamina в растворе, а также недостаток соды для коррекции рН снижают степень модифицирования (определяемую по количеству реакционноспособных функциональных групп), в результате чего волокно проявляет слабые сорбционные свойства или не проявляет их вообще.

Поэтому обязательным является контроль температурных и временных характеристик процесса, а также концентрации реагентов и кислотности среды.

Химическое модифицирование материала волокон исследовано с помощью методов ИК-спектроскопии и рентгеновской диффрактометрии.

Из результатов анализа ИК-спектров образцов ПАН, полученных до и после химической обработки (рис. 7.1, табл. 7.2.), видно, что модифицирование материала волокон происходит за счет уменьшения содержания $C\equiv N$ связей в аминогруппах. Значительное увеличение интенсивности пиков, соответствующих $C=N$ связям, подтверждает протекание процесса модифицирования по приведенной выше схеме (см. формулу 7.1).

Изменение характера ИК-спектра волокон после сорбции ионов Cu^{2+} (рис. 7.1.) в области частот $500-1600\text{ см}^{-1}$ указывает на значительные структурные изменения в волокнах.

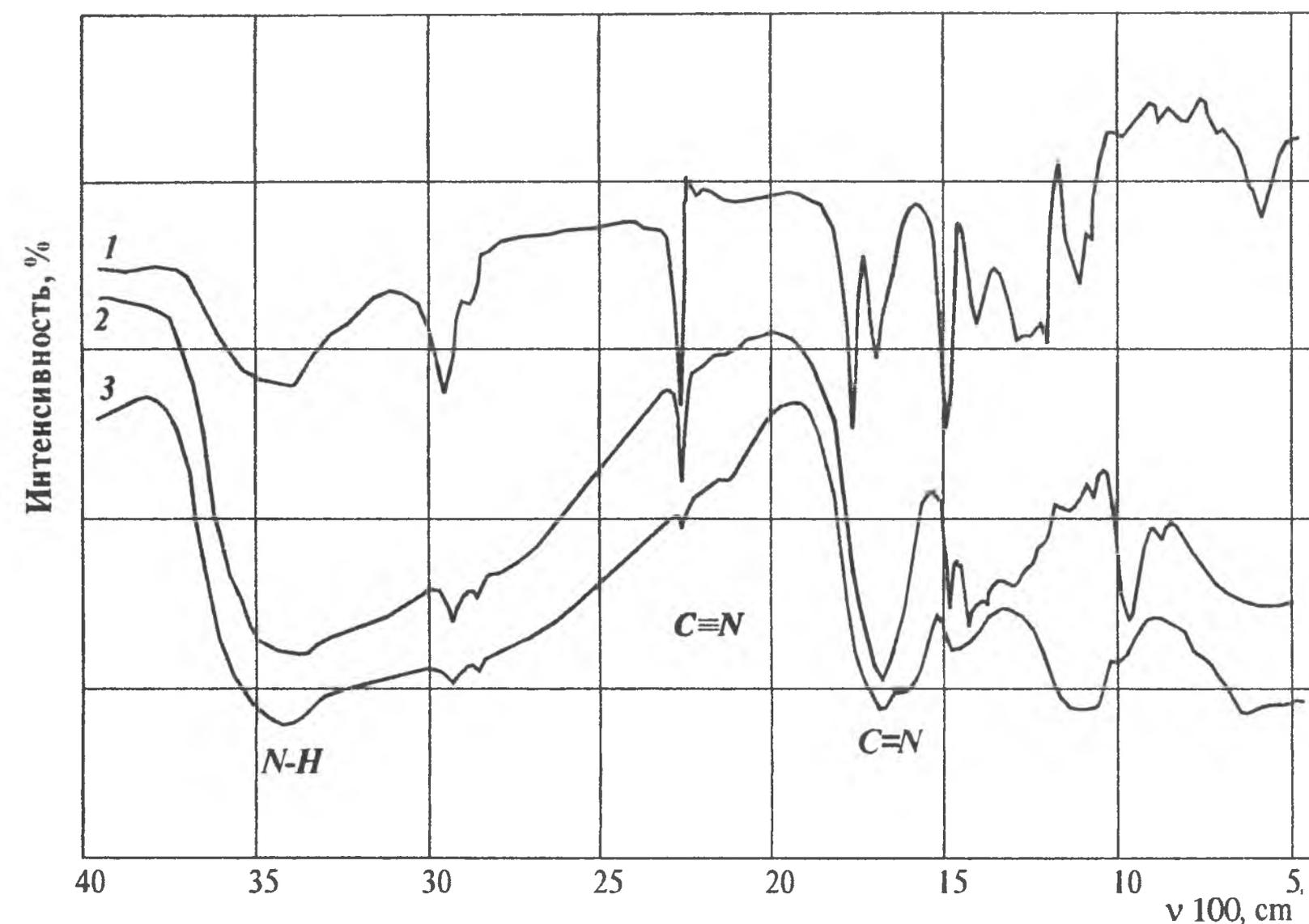


Рис. 7.1. ИК спектр образцов ПАН: 1 – исходный материал, 2 - модифицированный материал, 3 – материал после сорбции ионов меди (II)

Количество синтезированных реакционноспособных функциональных групп на волокнах ПАН установлено по сорбции ионов $Cu(II)$ в статических условиях. В качестве раствора для сорбции использован насыщенный водный раствор медного купороса. Волокна выдерживаются в растворе при комнатной температуре в течение суток, после чего они отмываются дистиллированной водой от избытков ионов

сорбируемого вещества. Концентрацию ионов Cu(II) определяли трилонометрическим титрованием [368]. Установлено, что модифицированные волокнистые материалы имеют высокую сорбционную емкость, достигающую 5 ммоль/г.

Таблица 7.2.

Анализ результатов ИК-спектроскопии модифицированных волокон ПАН

| № пика | ν , cm^{-1} | Характерн. связь | ПАН | ПАН- NH_2 | ПАН- $\text{H}_2\text{N-Cu}$ |
|--------|--------------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|
| 1 | 3420-3460 | N-H амины | | 3415 | 3415 |
| 2 | 2575-3500 | оксимы | 2920 узкая | 2916 слаб. | 2916 слаб. |
| 3 | | | 2860 слаб., широкая | 2846 слаб. | 2846 слаб. |
| 4 | 2240 | вал. $\text{C} \equiv \text{N}$ | 2245 узкая, сильн. | 2240 узкая, средн. | 2238 слаб. |
| 5 | | | 2188 очень сильн. | - | 2076 |
| 6 | | вал. $\text{C}=\text{N}$ в оксимах | 1737 сильн. | 1725 | - |
| 7 | 1690-1640 | | 1665 средн. | 1660 очень сильн. | 1655 |
| 8 | 1400 ± 100 | | 1455 узкая, сильн. | 1454 узкая, средн. | 1450 |
| 9 | | | 1360 средн. | 1390 средн. | - |

Обнаружено, что ПАН волокна, подвергнутые модифицированию, хорошо сорбируют ионы Cu^+ , Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Ti^{3+} , а также ионы благородных металлов и др.

Сорбция ионов металлов должна осуществляться из водного раствора солей металлов с высокой растворимостью при нагревании до температуры не выше 50°C для сохранения механических свойств волокон. Повышение температуры во время обработки увеличивает скорость реакции, однако, длительная обработка приводит к заметному ухудшению гибкости и прочности волокон.

Модифицированные волокна ПАН и волокна после сорбции ионов металлов имеют рентгеноаморфную структуру, как видно из результатов структурного анализа (рис 7.2, 7.3).

Анализ структуры материалов проводили методом дифракции рентгеновского излучения на установке ДРОН-3.0, используя $\text{Cu}_{k-\alpha}$ излучение (длина волны $\lambda=1,5417737 \text{ \AA}$). Запись дифракционной картины на диаграммную ленту производилась со скоростью 1000 имп/с в диапазоне углов от 10° до 80° .

Рентгенограммы записаны в координатах интенсивность – угол (2θ). Обработка полученной рентгенограммы производилась путем оценки относительной интенсивности дифракционных линий по 100-балльной шкале путем измерения площади пиков и принятия площади самого большого пика за 100.

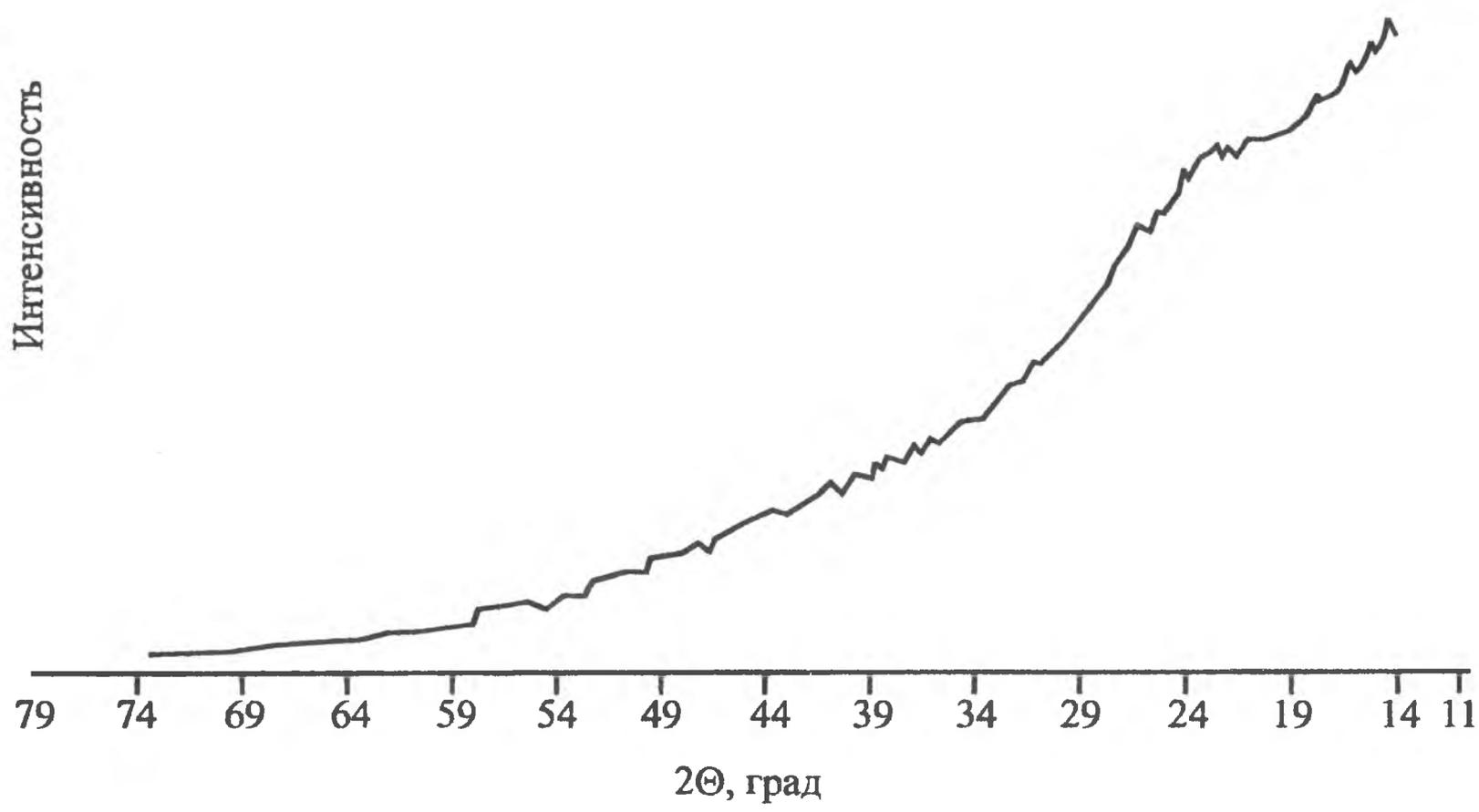


Рис. 7.2. Дифрактограмма исходного полиакрилонитрильного волокна

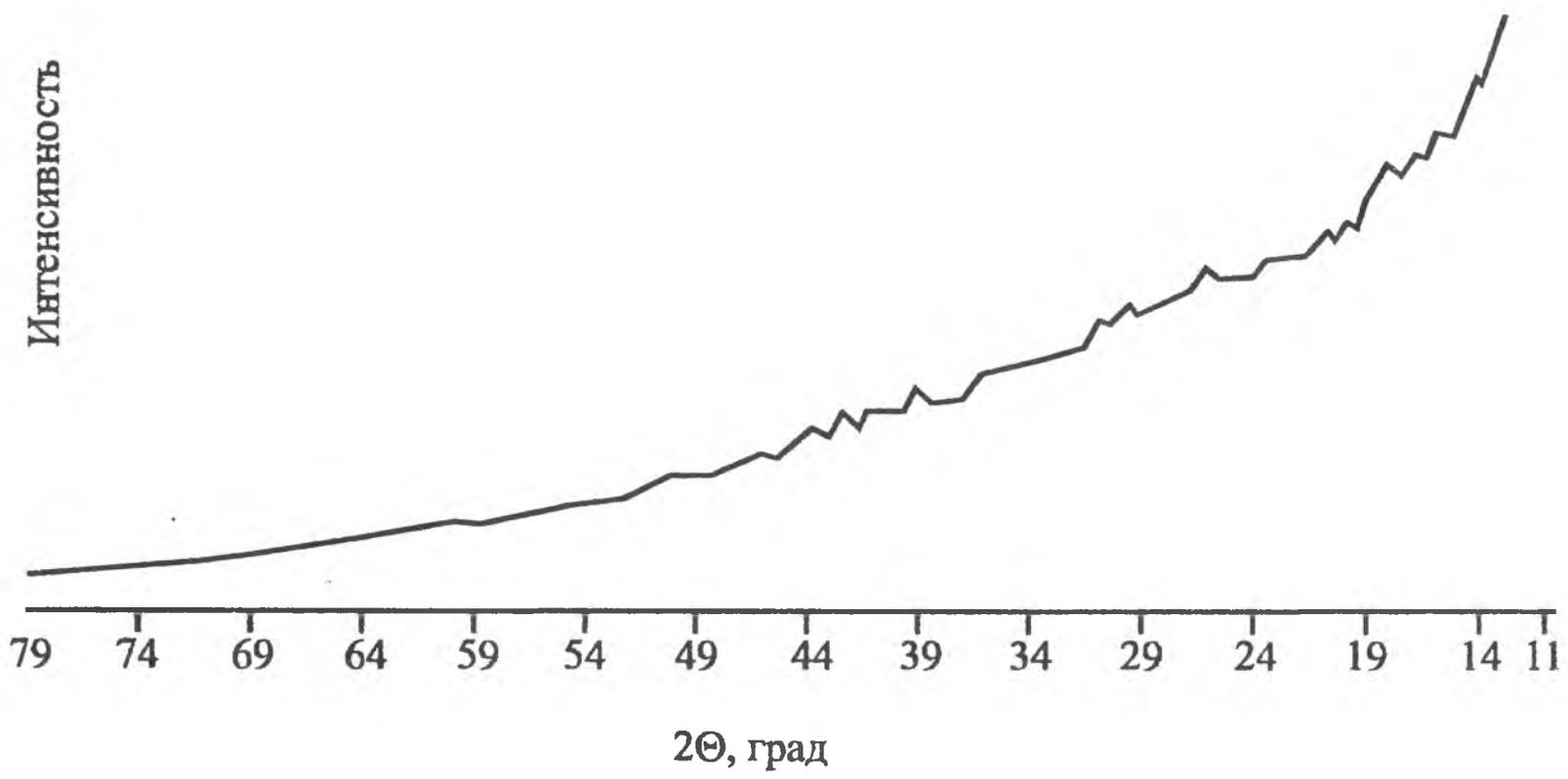


Рис. 7.3. Дифрактограмма модифицированного полиакрилонитрила

Межплоскостные расстояния определяются исходя из уравнения Вульфа-Брэгга, по измеренным углам отражения для дифракционных пиков:

$$n\lambda = 2d\sin\theta, \tag{7.2}$$

где λ - длина волны рентгеновского излучения,
 n – порядок отражения,
 d – межплоскостное расстояние,
 θ - угол отражения.

Шумы, обнаруженные на дифрактограммах, а также увеличение интенсивности рассеянного рентгеновского излучения в области малых углов дифракции объясняется влиянием органической составляющей волокон [369].

7.1.4. Механические свойства модифицированных волокон

Как показано методами ИК спектроскопии, в результате модифицирования происходит изменение химической структуры обрабатываемого материала, что сказывается на механических свойствах волокон.

Эластичность, гибкость, прочность волокон определяются степенью полимеризации волокнистого материала. Наиболее прочными синтетическими волокнами являются лавсановые, со свойствами которых сравнивают другие волокна.

Механические характеристики волокна оцениваются прочностью на разрыв и разрывным удлинением. Прочность на разрыв характеризуется величиной разрывной нагрузки, т. е. наибольшим усилием, выдерживаемым образцом стандартного размера к моменту разрыва. Величина разрывной нагрузки определяется в ньютонах (Н).

Эластичные свойства можно оценивать по разрывному удлинению волокон, которое определяет деформацию, возникающую под действием растягивающей нагрузки к моменту разрыва. Разрывное удлинение определяют в относительных единицах в процентах от первоначальной длины нити по формуле

$$\varepsilon = \frac{L_k - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%], \quad (7.3)$$

где L_0 – начальная длина нити,

L_k – конечная длина нити.

Для исследований механических характеристик были приготовлены образцы нитей длиной 20 см из одной партии ПАН волокон, было проведено их модифицирование и затем сорбция ионов меди (II) из водного раствора. Затем было отобрано по 15 образцов на каждом этапе: исходный материал, модифицированный материал, материал после сорбции меди. Измерение разрывной нагрузки и удлинения проводилось на универсальном релаксметре УР-1. Результаты измерений приведены в табл. 7.3 и 7.4.

Отмечено, что модифицирование уменьшает сопротивляемость материала механическим нагрузкам, а после сорбции ионов металлов ухудшаются и эластичные свойства нити. Такое поведение волокон обуславливается увеличением

степени сшивки между собой молекул полимера и введением неорганической составляющей в материал волокна, что придает волокнам дополнительную хрупкость.

Таблица 7.3

Разрывное удлинение нитей ПАН на различных этапах обработки

| Параметр | Исходный ПАН | Модифицированный ПАН | ПАН после сорбции Cu |
|--|--------------|----------------------|----------------------|
| Среднее арифметическое, % | 25,51 | 30,01 | 18,89 |
| Среднее отклонение, % | 3,66 | 1,78 | 2,44 |
| Коэффициент неравноты | 14,36 | 3,88 | 12,93 |
| Дисперсия | 17,09 | 3,88 | 8,83 |
| Среднее квадратичное отклонение | 4,13 | 1,97 | 2,97 |
| Коэффициент вариаций, % | 16,20 | 6,57 | 15,74 |
| Ошибка выборки с вероятностью 0,954 | 2,21 | 1,61 | 0,99 |
| Относительная ошибка с вероятностью 0,954, % | 8,66 | 5,36 | 5,25 |

Таблица 7.4

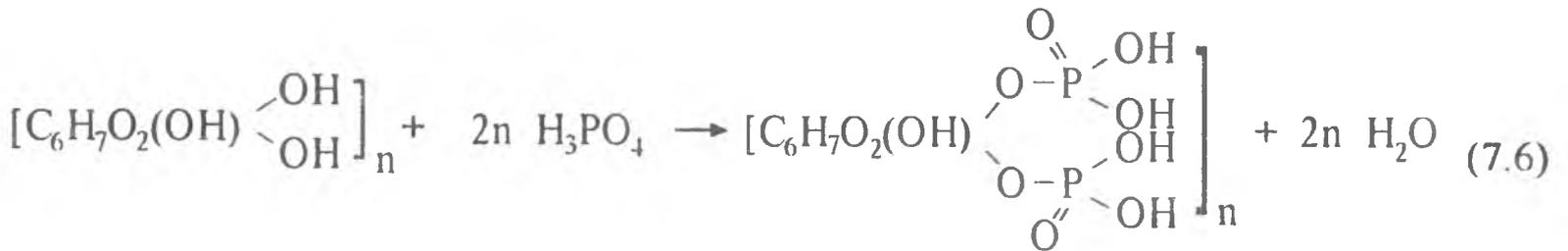
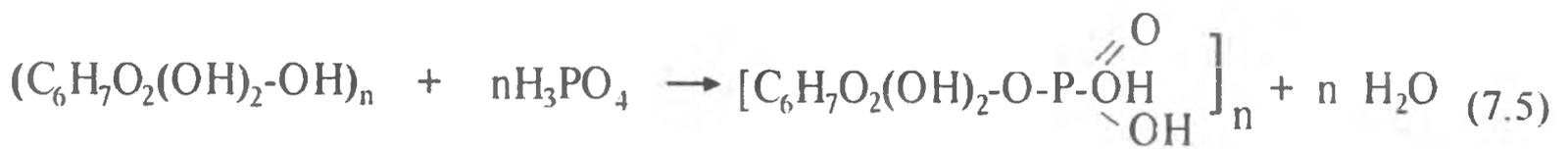
Разрывная нагрузка нитей ПАН на различных этапах обработки

| Параметр | Исходный ПАН | Модифицированный ПАН | После сорбции Cu |
|--|--------------|----------------------|------------------|
| Среднее арифметическое, Н | 5,67 | 4,83 | 3,8953 |
| Среднее отклонение, Н | 0,33 | 0,22 | 0,3195 |
| Коэффициент неравноты | 5,84 | 4,52 | 8,2012 |
| Дисперсия | 0,20 | 0,06 | 0,1466 |
| Среднее квадратичное отклонение | 0,45 | 0,25 | 0,3829 |
| Коэффициент вариаций, % | 7,98 | 5,25 | 9,8301 |
| Ошибка выборки с вероятностью 0,954 | 0,24 | 0,21 | 0,1294 |
| Относительная ошибка с вероятностью 0,954, % | 4,26 | 4,28 | 3,3232 |

7.1.5. Методика фосфорилирования целлюлозных волокон

Известно, что элементарное звено в макромолекуле целлюлозы содержит три свободные гидроксильные группы. Из них одна группа является первичной и две - вторичные. Они значительно отличаются по реакционной способности. Формула элементарного звена имеет вид

Основываясь на способности гидроксильных групп целлюлозы вступать в различные реакции, проводилось модифицирование целлюлозы по следующей схеме:



Нужно отметить, что записанные уравнения реакций дают упрощенное описание на самом деле более сложного характера взаимодействий, протекающих при синтезе этих материалов. Замещение OH-групп целлюлозы на фосфатные группы может быть как частичным, так и полным. При изучении реакций были установлены некоторые особенности. Так называемый "стандартный" метод синтеза осложнен окислением целлюлозы кислородом воздуха, что приводит, как уже отмечалось, к потере прочности на 20%. Поэтому специально изучался процесс фосфорилирования целлюлозы в расплаве фосфата мочевины. Изучение этих реакций позволило предложить рекомендации методического характера, которые приведены ниже.

Экспериментальные образцы представляли собой измельченные волокна хлопка, льна или вискозы и кусочки трикотажного полотна, изготовленного из хлопчатобумажной пряжи линейной плотностью 10 текс переплетением гладь.

Образец весом около 5 г высушивался в сушильном шкафу до постоянной массы при температуре 100°C. Готовился расплав для фосфорилирования. Для этого в фарфоровой чашке для выпаривания подогревалось до 100°C 50 г концентрированной фосфорной кислоты. Это количество кислоты смешивалось с 200 г мочевины и ставилось в сушильный шкаф, нагретый до 110-120°C и выдерживалось там до полного расплавления всей массы. Образец пропитывался в течение получаса данным расплавом, затем отжимался с помощью металлического шпателя от избытка расплава, помещался в чашку Петри, накрывался другой чашкой Петри и выдерживался при 150-160°C в течение получаса. Оставшаяся часть расплава использовалась повторно для других обработок [370].

7.2.1. Характеристика осаждаемых материалов

Наиболее перспективными для создания радиопоглотителей являются материалы с большими магнитными и диэлектрическими потерями, характеристическое сопротивление которых приближается к сопротивлению свободного пространства.

Синтез таких материалов можно осуществить, используя закрепление неорганического вещества в полимерной матрице. Широкое применение нашли частицы ферритов, ферромагнитных веществ, фиксация которых производилась в высокомолекулярных смолах или пластмассах, а также другие способы создания композиционных проводящих и магнитных структур. Закрепление неорганики в волокнистой матрице можно осуществить методами пропитки, химической сорбции, осаждения материала на поверхность волокон и др. Метод пропитки обладает недостатками, связанными со слабой связью неорганического вещества с полимером, обеспечиваемой в основном за счет сил Ван-дер-Ваальса и водородных, вследствие чего может происходить отрыв частиц от волокон и ухудшение эксплуатационных характеристик материала. Наиболее перспективными для создания композиционных материалов на основе органических волокон являются методы, основанные на химической сорбции [371].

При использовании сорбционных методов для осуществления синтеза сложных соединений необходимо провести большое число последовательных химических реакций, что значительно осложняет синтез ферритовых структур. Кроме того, осаждение ферритов не позволит повысить эффективность поглощения ЭМИ за счет использования потерь электромагнитной энергии, связанных с наведением паразитных токов, которые могут возникнуть в средах с проводимостью. Поэтому предложено использовать метод синтеза обладающих электропроводящими и ферромагнитными свойствами частиц никеля, кобальта, железа и их сплавов в матрице модифицированных волокон полиакрилонитрила и целлюлозы.

Другой путь получения электропроводящих волокнистых материалов заключается в формировании на поверхности волокон слоев сульфидов и селенидов металлов. Известно, что проводимость полимеров повышается с помощью образования поверхностных токопроводящих слоев из сульфидов или селенидов металлов (CuS , PbS , CdS , NiS) [372]. Поскольку модифицированные волокна ПАН и фосфата целлюлозы имеют высокую сорбционную емкость по отношению к ионам меди, то для исследования влияния эффекта электропроводности на отражающие свойства экранов на основе волокон с токопроводящими частицами разработаны новые методы синтеза токопроводящих слоев CuS и Cu_2S .

7.2.2. Формирование наночастиц металлов из водных растворов

В настоящее время известно и широко используется несколько технологий химической металлизации диэлектриков, основанных на осаждении металла из водных растворов солей [373]. Осажденный по этим технологиям никель обладает меньшей пористостью, высокой равномерностью, большей твердостью, коррозионной стойкостью и износостойкостью по сравнению с электрохимическими покрытиями. Металлизацию производят путем обработки диэлектрических деталей в растворах, в которых покрытия образуются в результате химического восстановления ионов металла, присутствующих в растворе. Полученный тонкий слой восстановленного металла затем доращивают гальваническим способом до необходимой толщины [374]. Этот процесс является многостадийным.

При осаждении металлов поверхность пластмассовой подложки подвергается предварительной обработке, травится, сенсibiliзируются и активируется. Подготовка поверхности заключается в механической или химической обработке с целью создания на поверхности шероховатости, обеспечивающей необходимую прочность сцепления, а также для удаления жировых пленок. Операция обезжиривания производится после механической обработки и перед химическим травлением для обеспечения равномерного травления по всей поверхности. Травление необходимо для улучшения адгезии осаждаемого материала с подложкой. В результате химической обработки в растворах, содержащих сильные окислители, поверхностный слой материала частично разрушается с образованием микрошероховатости и изменяется химическая природа выходящих на поверхность полимерных молекул. Поверхность слоя легко смачивается водой (становится гидрофильной) вследствие образования полярных групп. После травления производится отмывка диэлектрика от остатков компонент травильных растворов.

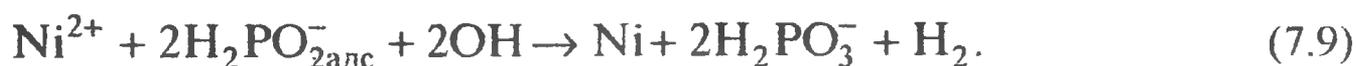
Химическое восстановление никеля или кобальта является автокаталитической реакцией, так как металл, образовавшийся в результате химического восстановления из раствора, катализирует дальнейшую реакцию восстановления этого же металла. Но для начального периода восстановления необходимо, чтобы покрываемая поверхность имела каталитические свойства, которые создаются в результате активирования. Активирование заключается в том, что на обрабатываемую поверхность химическим путем наносят чрезвычайно малые количества металлов, являющихся катализаторами реакции химического восстановления. Такими катализаторами являются коллоидные частицы или малорастворимые соединения палладия, платины, золота, серебра. Самое широкое распространение получил палладий, обладающий высокой каталитической активностью.

Образование каталитического слоя в виде металла, находящегося в коллоидном состоянии, осуществляется в две стадии: сенсibiliзирование - нанесение пленки раствора, восстанавливающего каталитический металл (палладий) из раствора его соли; активирование - погружение в раствор соли металла-

катализатора и восстановление его до металлического состояния в пленке раствора, прилегающей к поверхности диэлектрика.

Раствор для химической металлизации содержит, помимо соли осаждаемого металла и восстановителя (в качестве которого наибольшее распространение получил гипофосфит натрия), буферное соединение для стабилизации кислотности раствора, комплексообразователь для предотвращения выпадения осадков соединений никеля и стабилизатор, действие которых основано на изоляции комплексов никеля от взаимодействия с раствором.

Согласно современным представлениям, суммарный процесс химического восстановления никеля гипофосфитом описывается формулами



Химически восстановленный никель имеет аморфную структуру, которая переходит в кристаллическое состояние при нагревании.

Существует несколько разновидностей растворов, используемых для химического никелирования, в которых в качестве восстановителя кроме гипофосфита натрия может использоваться сульфат гидразина, тетрагидроборат натрия и др. [375]. При этом происходит соосаждение ионов бора, фосфора, серы совместно с металлом.

Наноструктурированные волокна ферромагнитных никеля, кобальта и их сплавов с железом можно получать при химическом восстановлении ионов металлов комплексами титана (III) [376].

Скорость осаждения никеля из раствора без коррекции концентрации компонент изменяется таким образом, что выполняется необходимое условие для формирования металлических кластеров в полимерной матрице (модифицированное полиакрилонитрильное волокно) - высокая скорость формирования частиц металла на первом этапе и низкая скорость роста частиц в процессе осаждения.

Таким образом, формирование кластеров никеля в полимерной волокнистой матрице возможно с использованием видоизмененной методики химического никелирования, в которой предварительная обработка поверхности диэлектрика, его обезжиривание и гидрофилизация путем уменьшения содержания гидрофобных связей в аминогруппах производится в процессе модифицирования материала подложки.

Формируемые частицы, содержащие несколько атомов вещества, принято называть кластерами. Химия кластеров связана преимущественно с препаративным синтезом устойчивых кластерных соединений переходных металлов, и основное внимание в этой области уделяется особенностям взаимодействия атомов металлов друг с другом и с окружающими их лигандами, а также структуре кластерных

молекул. Наличие плотной упаковки лигандов на поверхности кластеров является, по-видимому, обязательным условием, обеспечивающим их устойчивость. Оболочка лигандов понижает поверхностную энергию и создает пространственные затруднения для коалесценции металлических агрегатов. "Голые" кластеры крайне неустойчивы и необходимы специальные приемы их стабилизации на охлаждаемых поверхностях или матрицах. Имеются все основания полагать, что наноразмерные кластеры, включающие от 2 до 10 атомов, возникают на промежуточных этапах различных химических процессов, связанных с восстановлением или окислением металлов.

При формировании частиц металлов из водных растворов путем химического восстановления ионов металлов процесс образования кластеров подразделяется на несколько стадий [377]. В растворе соли происходит восстановление ионов, последующая агрегация возникших атомов и ионов приводит к образованию малых кластеров различной сложности, далее – квазиметаллических частиц, а на заключительной стадии – и золь металла. Последовательная агрегация частиц делает возможным постепенный переход от атомно-молекулярных свойств малых частиц к свойствам объемного материала.

В процессе восстановления ионов металлов в водных растворах формированию металлической фазы предшествует образование нейтральных или заряженных гомометаллических частиц, состоящих из атомов и ионов одного металла. На промежуточных стадиях восстановительного процесса (неполное восстановление) возникают только положительно заряженные и кинетически достаточно устойчивые кластеры (среднее время их жизни существенно превышает время, соответствующее реакциям, контролируемым диффузией). Эти кластеры, последовательно укрупняясь, трансформируются в коллоидный металл. Формирование положительно заряженных кластеров различной степени сложности является достаточно общим свойством ионов металлов в необычных состояниях окисления.

Синтез частиц никеля или кобальта происходит по практически одинаковым схемам, так как эти элементы обладают сходной кристаллической структурой, физическими и химическими свойствами. Восстановление протекает путем присоединения двух недостающих электронов от восстановителя (см. формулу 7.7). Затем за короткое время атомы никеля трансформируются в простейшие кластеры

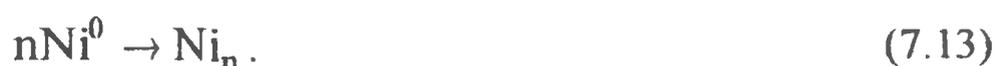


Этот процесс протекает достаточно быстро в течение 3-5 мкс, затем появляются более энергетически устойчивые кластеры, представляющие собой кубическую или тетраэдрическую заряженную структуру Ni_4^{4+} . При формировании

кластеров из огромного количества формально возможных и различающихся числом и соотношением ионов и атомов в них образуется несколько комбинаций, соответствующих числу атомов, равному 1, 2, 3, 4, 8 и т.д., что обуславливается наиболее энергетически выгодными параметрами структуры. Отличительным признаком таких кластеров от всех прочих является соответствие их структурных и электронных свойств свойствам компактного металла, кроме того, важным оказывается соответствие их конфигурации структурным фрагментам гранцентрированной кубической решетки металла, а число атомов в кластере и его заряд должны быть четными.

Особенностью формирования кластеров металлов с незаполненной d-оболочкой, к которым относятся осаждаемые никель, кобальт, железо, является склонность этих металлов образовывать промежуточные и относительно устойчивые металлоорганические соединения. Последующие реакции таких соединений приводят к формированию коллоидного металла.

Сложность формируемых кластеров также зависит от концентрации восстановителя в растворе, что связано с восстановлением ионов металлов до металлического состояния при избытке свободных электронов. Поэтому в случае формирования частиц никеля из водных растворов химическим восстановлением нуклеация происходит через промежуточные стадии образования заряженных металлических и металлоорганических кластеров с числом атомов, не превышающем четырех, коалесценции кластеров, перехода в золь и синтеза металлических частиц:



При синтезе композиционных волокнистых материалов методом осаждения металлов из водных растворов формирование материала происходит через образование металлических или металл-полимерных кластерных структур, причем в случае образования связей с углеродными цепями полимеров происходит изменение окружения этих атомов, связанное с образованием наночастиц сложного строения: центральная часть состоит из ядра размером несколько нм – атома металла в нульвалентном состоянии, которое одновременно покрыто слоем оксида или карбида металла и поверхностным слоем атомов металла, связанных химической связью с атомами углерода, водорода или азота полимерной цепи [378].

При таком осаждении образуются ультрадисперсные частицы, в которых при относительно низких температурах могут активно протекать такие процессы, как рекристаллизация, спекание, образование твердых растворов, новых химических соединений и др. [379]

На основе модифицированных полиакрилонитрила и целлюлозы были синтезированы материалы, содержащие частицы никеля, кобальта и сплавов Ni-Co и Ni-Fe. Для осаждения использовались экспериментальные образцы трикотажных полотен из волокнистых материалов, предварительно подвергнутые модифицированию.

7.2.3. Методика синтеза никельсодержащих материалов

Волокнистые материалы, обладающие комплексом электропроводящих и экранирующих свойств, синтезируются на основе модифицированных волокон ПА и хлопка следующим способом, включающим в себя:

1. Сорбцию ионов металлов из водного раствора.
2. Химическое восстановление сорбированных ионов.
3. Химическое осаждение металла из раствора.

Синтез никельсодержащих ПАН и целлюлозных волокон

Ультрадисперсные частицы в матрице волокон формируются путем химического осаждения никеля из раствора с использованием палладия в качестве инициатора реакции восстановления ионов Ni^{2+} катализатора, а также путем использования каталитических центров металлизации, состоящих из кластеров самого никеля.

В первом случае использовалась видоизмененная технология металлизации диэлектриков, заключающаяся в модифицировании материала волокон, создании каталитических центров металлизации по "стандартной" методике [380] и осаждении металла. При исследовании сорбции ионов палладия было обнаружено, что модифицированный ПАН обладает повышенными сорбционными свойствами по отношению к ионам Pd^{2+} , поэтому для равномерного распределения активных центров металлизации по всей поверхности материала, было предложено использовать метод конкуренции, заключающийся в понижении сорбционной активности материала путем предварительного связывания избыточных активных функциональных групп другими ионами. С этой целью модифицированные ПА волокна сначала обрабатывались при нагревании до $70^{\circ}C$ слабокислым раствором соли $Ti(IV)$ в течение 10 мин (при этом волокно равномерно окрашивалось в яркий оранжевый цвет), а затем разбавленным солянокислым раствором $PdCl_2$ (0,01 н) последующей активацией при нагревании до $60-70^{\circ}C$ в растворе гипофосфита, после чего волокно приобретало бурый оттенок.

Металлизация никелем проводилась в гипофосфитном растворе химического никелирования ($pH=5,5$ при температуре $80-90^{\circ}C$ со скоростью осаждения около 5 мкм/ч) следующего состава:

| | |
|------------------------|---------|
| $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ | 30 г/л, |
| $NaH_2PO_2 \cdot H_2O$ | 20 г/л, |
| Сукцинат Na | 10 г/л. |

Осажденный никель имел, светлую серебристую окраску и располагался в основном на поверхности волокон.

Исследование структуры синтезированных материалов проводилось методами рентгенографического анализа на установке ДРОН-3.0 с использованием $Cu_{k-\alpha}$ излучения для общего качественного фазового анализа и оценки среднего размера кристаллических частиц, а также $Co_{k-\alpha}$ излучения, обладающего большей разрешающей способностью, но меньшей чувствительностью, для определения

параметров и типа кристаллической решетки, фаз, микронапряжений и микродисперсности.

Идентификация осажденного металла проводилась путем анализа дифрактограмм по ASTM картотеке (рис. 7.4., табл. 7.4) [381]. Рефлексы на дифрактограммах имеют вид "гало", что указывает на высокую степень дисперсности никеля. С увеличением времени осаждения ширина пиков уменьшается, что свидетельствует об увеличении размеров частиц (табл. 7.5) [382].

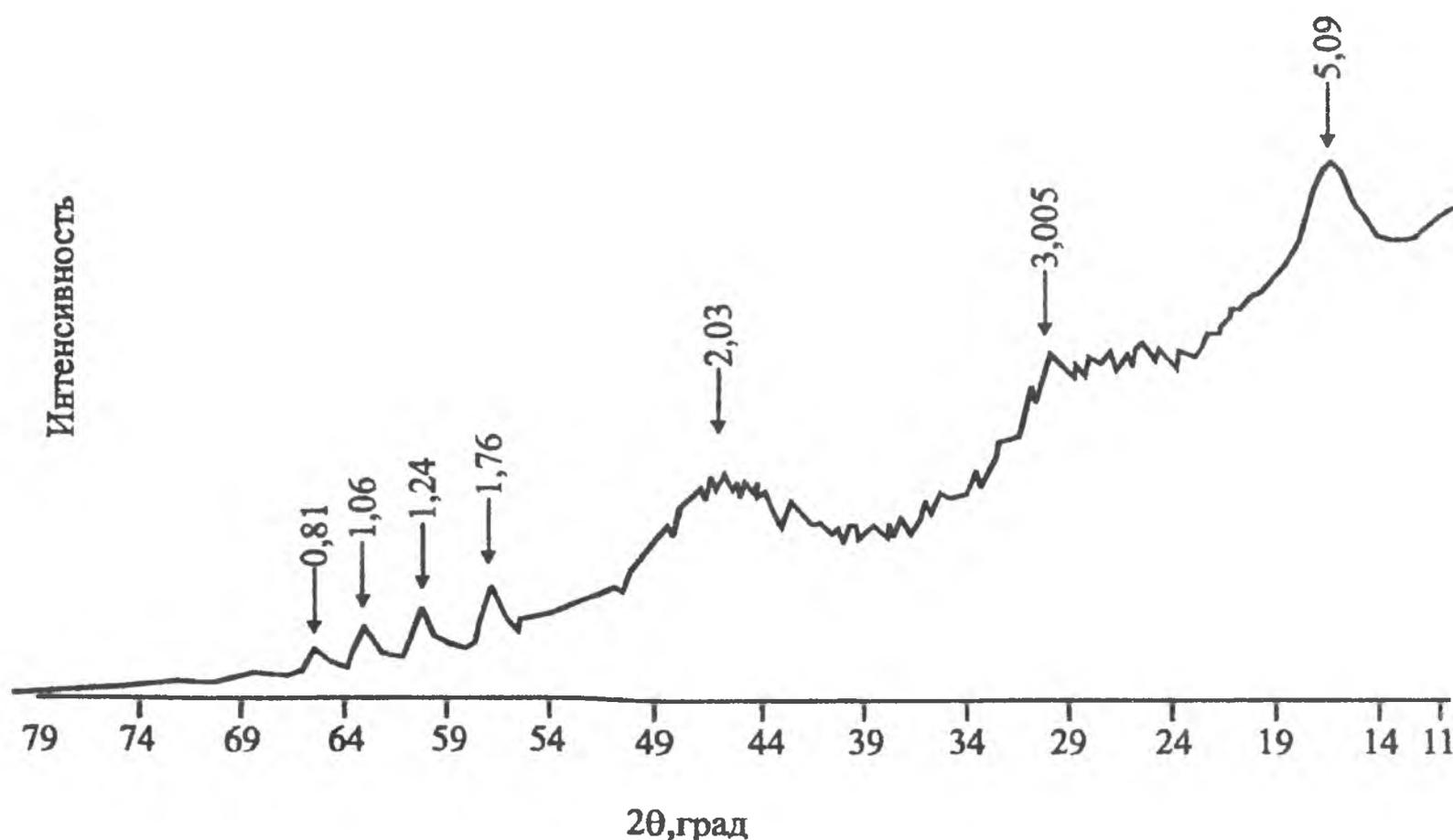


Рис. 7.4. Дифрактограмма волокон полиакрилонитрила после химического осаждения никеля (катализатор Pd)

Таблица 7.4

Результаты рентгенофазового анализа волокон полиакрилонитрила после химического осаждения никеля (катализатор Pd)

| № отклика | d, А | I/I ₀ , % | ASTM картотека | | |
|-----------|------|----------------------|----------------|----------------------|-----|
| | | | d, А | I/I ₀ , % | hkl |
| 3 | 2,03 | 100 | 2,034 | 100 | 111 |
| 4 | 1,76 | 30 | 1,762 | 42 | 200 |
| 5 | 1,24 | 15 | 1,246 | 21 | 220 |
| 6 | 1,05 | 15 | 1,0634 | 20 | 311 |
| 7 | 0,81 | 10 | 0,8084 | 14 | 331 |

По результатам рентгенофазового анализа было определено, что формируются частицы никеля кубической сингонии $SGO^5_{H-F_M3_M}$ с параметром решетки $a_0=252,38$ пм и числом формульных единиц $Z=4$.

Оценка размеров частиц Ni (катализатор Pd)

| Время осаждения, мин | β | θ | L, нм |
|----------------------|------------------|----------|-------|
| 30 | Рентгеноаморфный | | |
| 60 | 0,062 | 22,5° | 2,67 |
| 90 | 0,048 | 22,5° | 3,48 |

Оценку размеров кристаллитов L производили по формуле Селякова-Шеррера [383]:

$$L = \frac{A \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta}, \quad (7.14)$$

где β - ширина полосы на середине высоты максимума;
 A - константа, зависящая от формы частиц;
 λ - длина волны рентгеновского излучения;
 θ - угол дифракции.

Параметр A принимали равным 1, поскольку отсутствовала априорная информация о форме частиц. Для вычислений использовали характерные пики с максимальной амплитудой, угол дифракции составлял 22,5° ($hkl - 111$) для Ni.

Появление дополнительных пиков в области малых углов дифракции связано с формированием упорядоченной структуры металлоорганических кластеров, образуемых в процессе осаждения никеля. Эти пики появляются еще на начальной стадии осаждения никеля.

Осаждение основной массы никеля происходит преимущественно на поверхности волокон (рис. 7.6). Осадок имеет серебристый оттенок, близкий к цвету металлического никеля. Он формируется по всей поверхности и повторяет форму исходного волокна (рис. 7.5), как было установлено с помощью электронной сканирующей микроскопии.

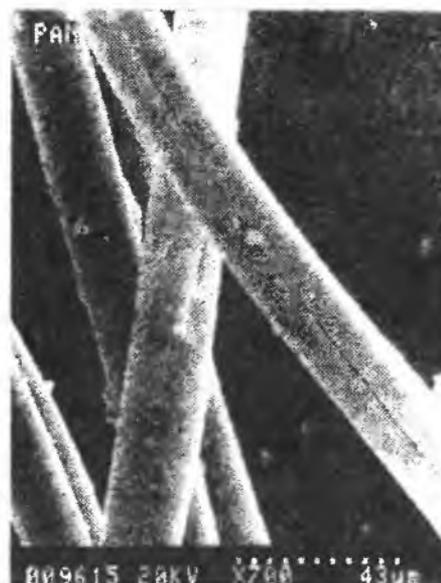
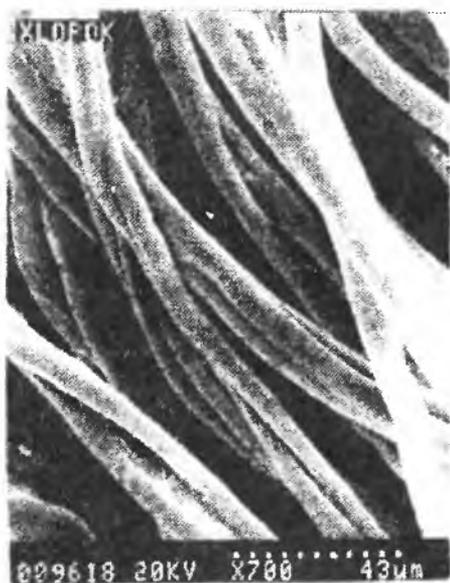


Рис. 7.5. Внешний вид исходных волокон ПАН и хлопка

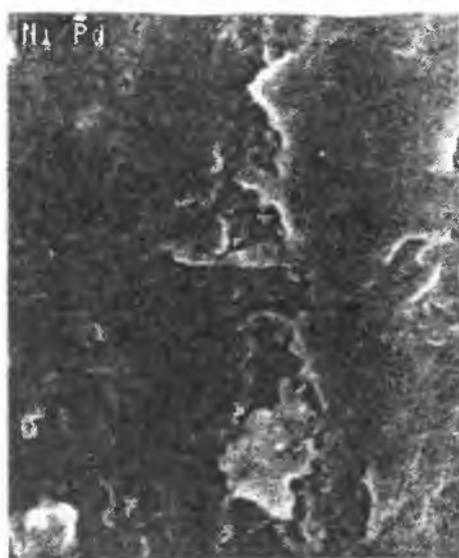


Рис. 7.6. Внешний вид модифицированных волокон ПАН с осажденным никелем (катализатор Pd)

Вторым методом, разработанным для формирования волокнистых кластерных металлорганических структур, является метод, основанный на химическом осаждении металла в присутствии предварительно сформированных путем химической сорбции металлических кластеров в матрице волокна. В этом случае сначала производится синтез металлорганических кластерных структур в полимерной матрице полиакрилонитрила восстановлением ионов металлов, а затем химическое осаждение металла из водных растворов.

Метод включает в себя несколько основных этапов – модифицирование материала волокон для придания им сорбционных и гидрофильных свойств, химическую сорбцию ионов никеля с последующим их восстановлением и, наконец, осаждение никеля из водных растворов. Для проведения экспериментов использовались образцы трикотажных полотен из ПАН, подвергнутых модифицированию гидроксиламином.

Модифицированные образцы помещались в раствор хлористого никеля, выдерживались при нагревании до 50°C в течение 3 ч для сорбции ионов Ni^{2+} , после чего образцы тщательно отмывались от избытка ионов металла и обрабатывались 0,1 молярным раствором восстановителя. В качестве восстановителей использовались гипофосфит натрия, борогидриды и др. В результате было предложено применить дитионит натрия как наиболее эффективный и доступный восстановитель, широко используемый в технологии кубового крашения текстильных материалов.

Дальнейшее осаждение металла проводилось из раствора следующего состава: 10 г $\text{NiCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1 г $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ на 300 мл воды при комнатной температуре.

В полученный раствор помещались образцы трикотажного полотна с предварительно сформированными каталитическими центрами металлизации, затем раствор постепенно нагревался до температуры 70°C , при которой начиналось инициирование реакции восстановления ионов Ni^{2+} из раствора. Полностью восстановленные и частично восстановленные ионы никеля образуют совместно с диэлектрической волокнистой матрицей особые кластерные структуры и закрепляются в полимере.

В результате исследования влияния температурного режима на протекание процесса синтеза было показано, что реакция восстановления ионов никеля в полимерной матрице дитионитом натрия является автокаталитической и инициируется при температуре 55°C . При проведении восстановления необходимо поддерживать концентрацию восстановителя на некотором постоянном уровне для полного восстановления ионов никеля в волокне.

При понижении концентрации восстановителя скорость реакции уменьшается, для дальнейшего осаждения металла необходимо охладить раствор до температуры 25°C , добавить восстановитель и раствор вновь подогреть до 55°C , после чего цикл повторяется.

В результате обработки материал волокна изменяет окраску и становится насыщенного черно-зеленого цвета, интенсивность которого возрастает с увеличением количества осаждаемого металла. Окрашивание происходит по всему объему волокон. При синтезе данным методом волокно разрыхляется, имеет развитую поверхность (рис. 7.7).

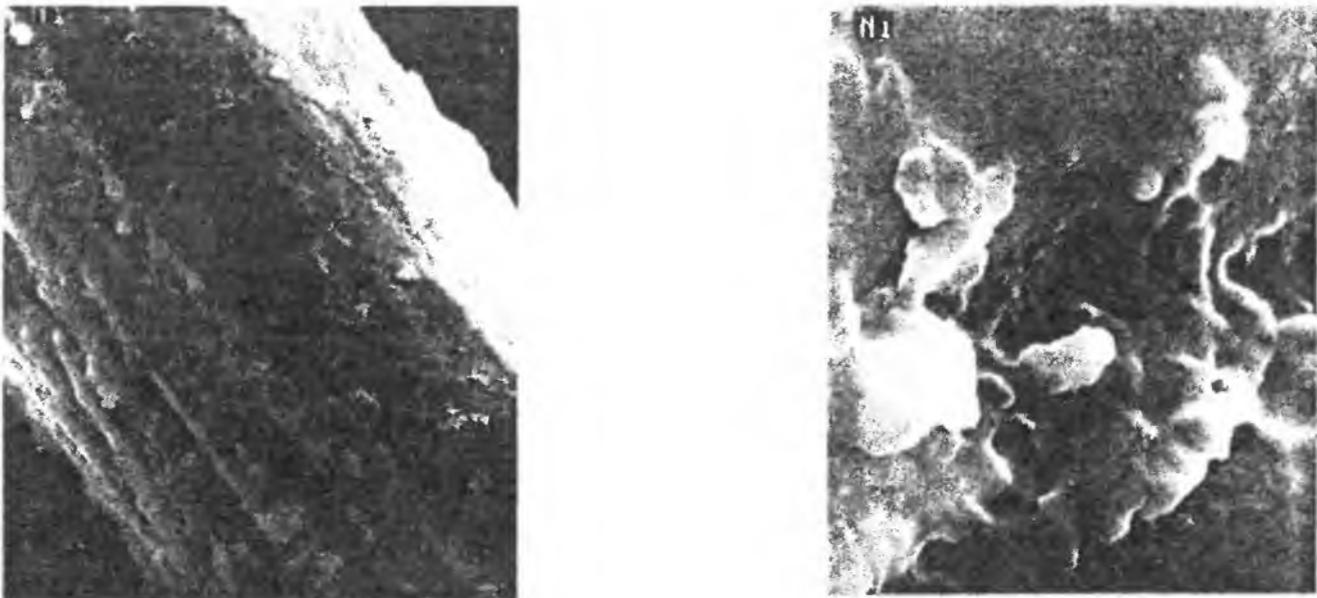


Рис. 7.7. Внешний вид модифицированных волокон ПАН с никельсодержащими кластерами, полученными по сорбционной методике

Элементный состав синтезированных материалов определялся методом Оже-электронной спектроскопии. Для исследования использовался электронный сканирующий Оже-спектрометр (Scanning Auger Multiprobe) PH1-660 фирмы Perkin Elmer (США) с анализатором типа "цилиндрическое зеркало". Энергия электронного луча – 5 кэВ, ток луча через образец 0,1 мкА, диаметр луча $5 \cdot 10^{-6}$ м. Оже-спектры снимались путем дифференцирования распределения вторичных Оже-электронов по энергиям в диапазоне 0-1000 эВ. Изменение интенсивностей Оже-пиков осуществляется с помощью многоканального анализатора в энергетических "окнах". Модулирующее напряжение – 4 эВ, постоянная времени – 0,1 с, скорость развертки спектра – 3 эВ/с. Остаточное давление в измерительной камере – $2,5 \cdot 10^{-8}$ Па. Для ионного профилирования образцов использовался пучок ионов аргона с энергией 3,5 кэВ при токе эмиссии – $10 \cdot 10^{-3}$ А и диаметре ионного пучка – 5-6 мм.

Количественный анализ проводился по методу чистых стандартов, где интенсивность токов Оже-электронов корректируется на коэффициент элементной чувствительности. Содержание химического элемента дается в атомных процентах относительно других элементов, при этом понимается, что суммарное количество атомов заданных элементов равно 100 %. Пересчет в весовые проценты проводится по соотношению

$$N_i (\text{вес.}\%) = \frac{N_i (\text{ат.}\%) \cdot M_i}{\sum_{i=1}^n N_i (\text{ат.}\%) \cdot M_i} \cdot 100 \% , \quad (7.15)$$

где M_i – атомный вес i -го элемента, в знаменателе должны быть учтены все элементы, имеющиеся в исследуемом образце.

Результаты Оже-спектроскопии подтвердили наличие в материале никеля, а также обнаружено незначительное содержание хлора, что объясняется тем фактом, что осаждение производилось из хлористого никеля и часть отрицательно заряженных ионов закрепляется на поверхности волокна (рис. 7.8). Кроме того, обнаружено наличие интенсивных пиков, соответствующих углероду, кислороду и азоту, что обусловлено органической составляющей материала.

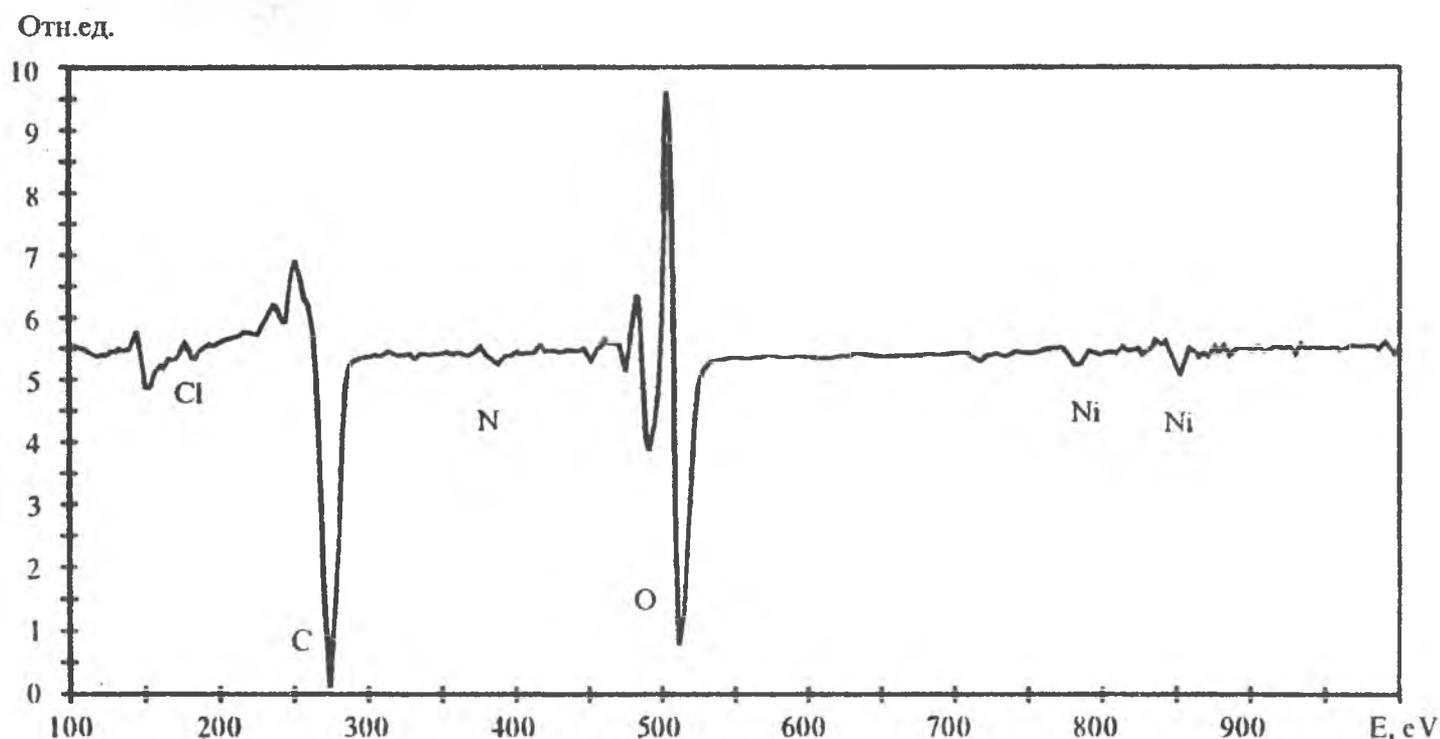


Рис. 7.8. Оже-спектр волокнистого материала, полученного осаждением никеля на модифицированные ПАН-волокна

Массовая доля осажденного никеля определялась гравиметрическим методом, при котором производится взвешивание образца трикотажного полотна в сухом состоянии при нормальных условиях до и после осаждения металла. Затем вычисляется абсолютный и относительный прирост массы образца в пересчете на квадратный сантиметр полотна:

$$\Delta m = m_2 - m_1, \quad (6.16)$$

$$\Delta\rho = \frac{\Delta m}{S}, \quad (6.17)$$

где m_1 - масса образца до осаждения,
 m_2 - масса образца после осаждения,
 S - площадь образца,
 Δm и $\Delta\rho$ - абсолютный и относительный прирост массы.

Разработка сорбционной методики синтеза никельсодержащих волокнистых материалов с использованием в качестве восстановителя дитионита натрия позволяет добиться увеличения массы трикотажного полотна до 10 мг/см^2 без заметного ухудшения механических характеристик нитей. Это соответствует содержанию никеля в материале до 15 % масс.

Структура синтезированного материала изучалась методами рентгеновской дифрактометрии на установке ДРОН-3.0 с использованием $\text{Co}_{K\alpha}$ излучения (рис. 7.9).

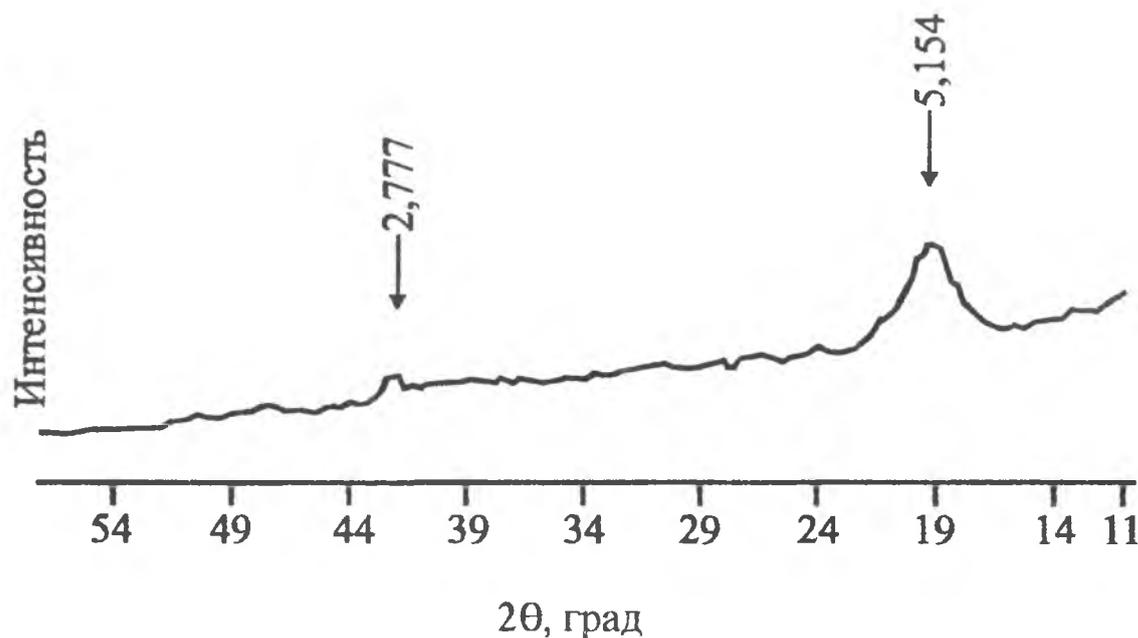


Рис. 7.9. Дифрактограмма материала после химического осаждения никеля в матрице модифицированных ПАН волокон

Результаты анализа дифрактограмм не позволили отнести идентифицируемую кристаллическую фазу ни к металлическому никелю, ни к одному из его неорганических соединений типа оксидов и гидроксидов. На дифрактограмме присутствует интенсивный растянутый дифракционный пик в области углов, соответствующих межплоскостному расстоянию $5,147 \text{ \AA}$, что является характерным для металл-полимерных комплексных соединений со слабым упорядочением кристаллической структуры и высокой степенью дисперсности.

Предложенная методика позволяет синтезировать металлсодержащие материалы и на основе хемосорбционных волокон других типов, если они обладают достаточной сорбционной емкостью по отношению к ионам осаждаемого металла.

Аналогичным образом протекает также процесс осаждения никеля в волокнистую матрицу фосфата целлюлозы путем восстановления ионов никеля из

водного раствора с помощью дитионита натрия. Для проведения экспериментов использовались фрагменты трикотажных полотен из модифицированного хлопка с сорбционной емкостью по Ni^{2+} порядка 1,15 ммоль/г. Как показали рентгеноструктурные исследования синтезированных материалов, наличие кристаллической фазы металлического никеля в целлюлозном волокне не было установлено (рис. 7.10, 7.11). Дифрактограммы как фосфорилированного хлопка, так и синтезированного волокнистого материала на основе хлопка имеют рефлексы, соответствующие фосфату целлюлозы и дополнительные пики, соответствующие межплоскостным расстояниям порядка 5 Å, однако кристаллографическая идентификация соединений никеля в этом случае также не дала положительных результатов.

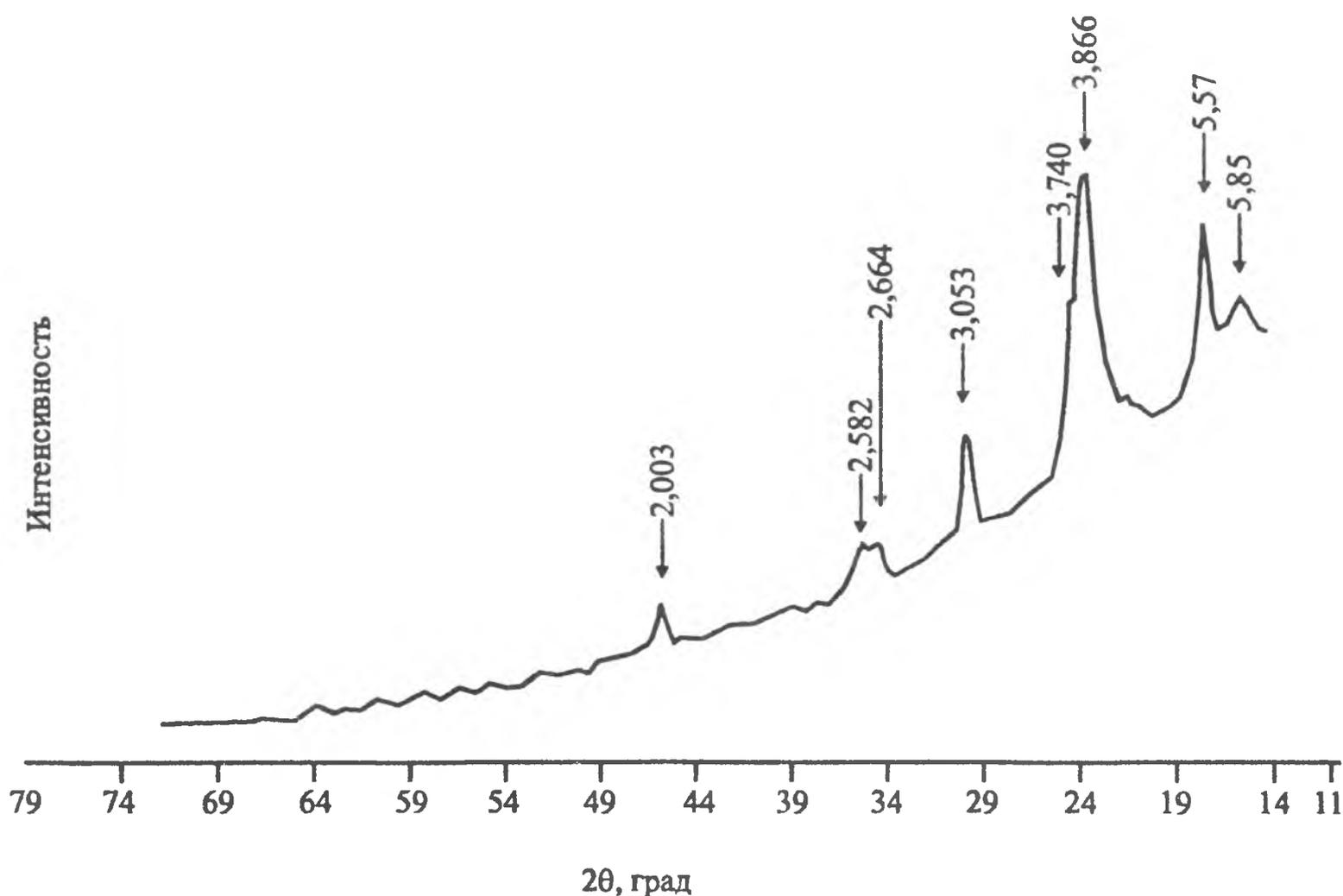


Рис. 7.10. Дифрактограмма фосфата целлюлозы (хлопок)

Присутствие характерных рефлексов в области больших межплоскостных расстояний позволяет предположить, что происходит упорядочивание рентгеноаморфных металлсодержащих кластеров за счет влияния структуры.

7.2.4. Методика синтеза кобальтсодержащих материалов

Так как никель и кобальт обладают сходными физическими и химическими свойствами, то методика формирования композиционных материалов, содержащих кобальт, во многом подобна методике синтеза волокнистых материалов с никелем [384]. Синтез кластеров в полимерной волокнистой матрице проводился методом химического восстановления ионов кобальта. С этой целью образцы модифицированного полиакрилонитрила в форме трикотажного полотна

помещались в одномолярный раствор сернистого кобальта и выдерживались в течение 2 суток при комнатной температуре. После чего образец отмывался от избытков раствора и затем проводилось восстановление ионов кобальта в волокне с помощью $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$. Созданные при этом каталитические центры способствовали протеканию процесса дальнейшего осаждения кобальта из раствора CoSO_4 . Реакция восстановления носит автокаталитический характер, причем образуются более высокодисперсные частицы кобальта по сравнению с никелевыми, как определено методами электронной микроскопии (рис. 7.12).

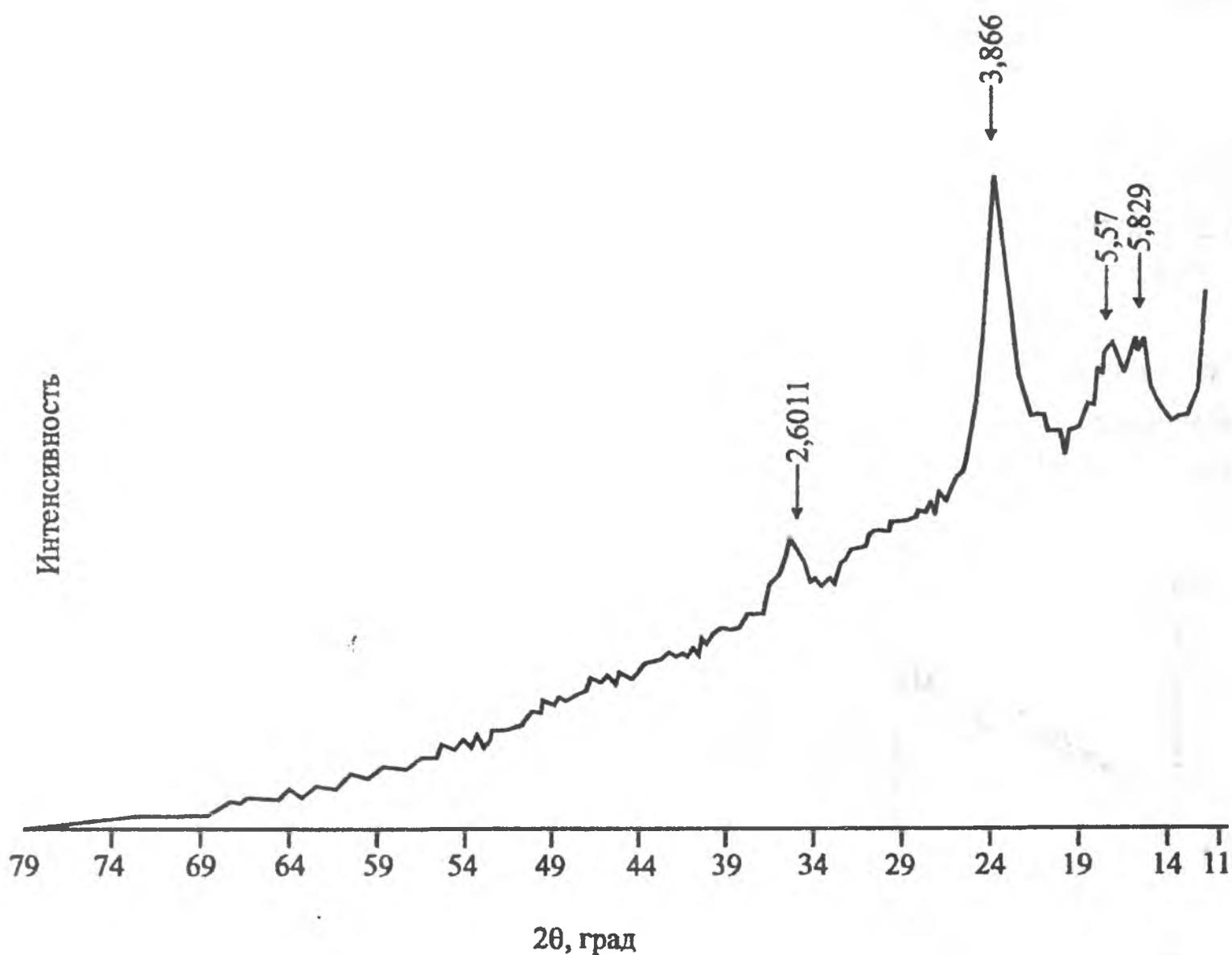


Рис. 7.11. Дифрактограмма фосфата целлюлозы после осаждения никеля

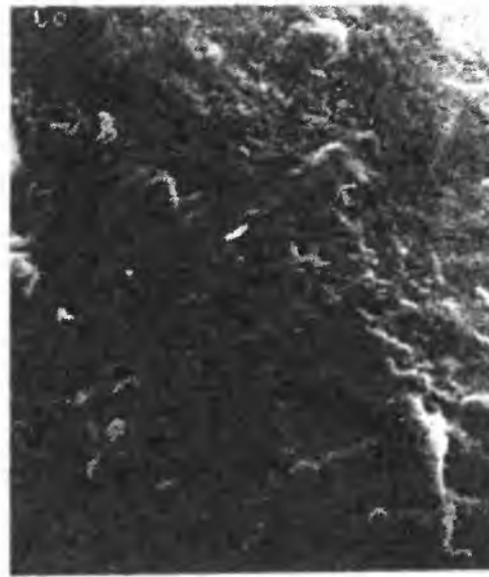


Рис. 7.12. Внешний вид модифицированных волокон ПАН с кобальтсодержащими кластерами

Характерные особенности процесса осаждения кобальта в волокнистые материалы связаны с понижением начальной температуры инициирования до 50°C и увеличением скорости реакции восстановления как во всем объеме раствора, так и в матрице из волокон. Осаждение производилось в несколько циклов по методике, аналогичной методике осаждения никеля. Масса осажденного металла ограничивается концентрацией каталитических центров в волокне, полученных восстановлением сорбированных ионов кобальта. Количество осажденного материала также определялось гравиметрическим методом. Прирост массы составлял до 12 мг/см^2 трикотажного полотна, толщиной 1 мм.

После осаждения образцы трикотажа отмывались от избытка осажденного кобальта и высушивались в сушильном шкафу при температуре, не превышающей 50°C . В результате обработки материал волокна окрашивался в насыщенный черный цвет, интенсивность которого была прямо пропорциональна массе осажденного кобальта.

Анализ элементного состава синтезированного материала методами Оже-электронной спектроскопии оказался затруднен, что связано со сложностью выявления пиков, соответствующих кобальту, на фоне высокоинтенсивных пиков и шумовых эффектов, обусловленных органической составляющей материала (рис. 7.13).

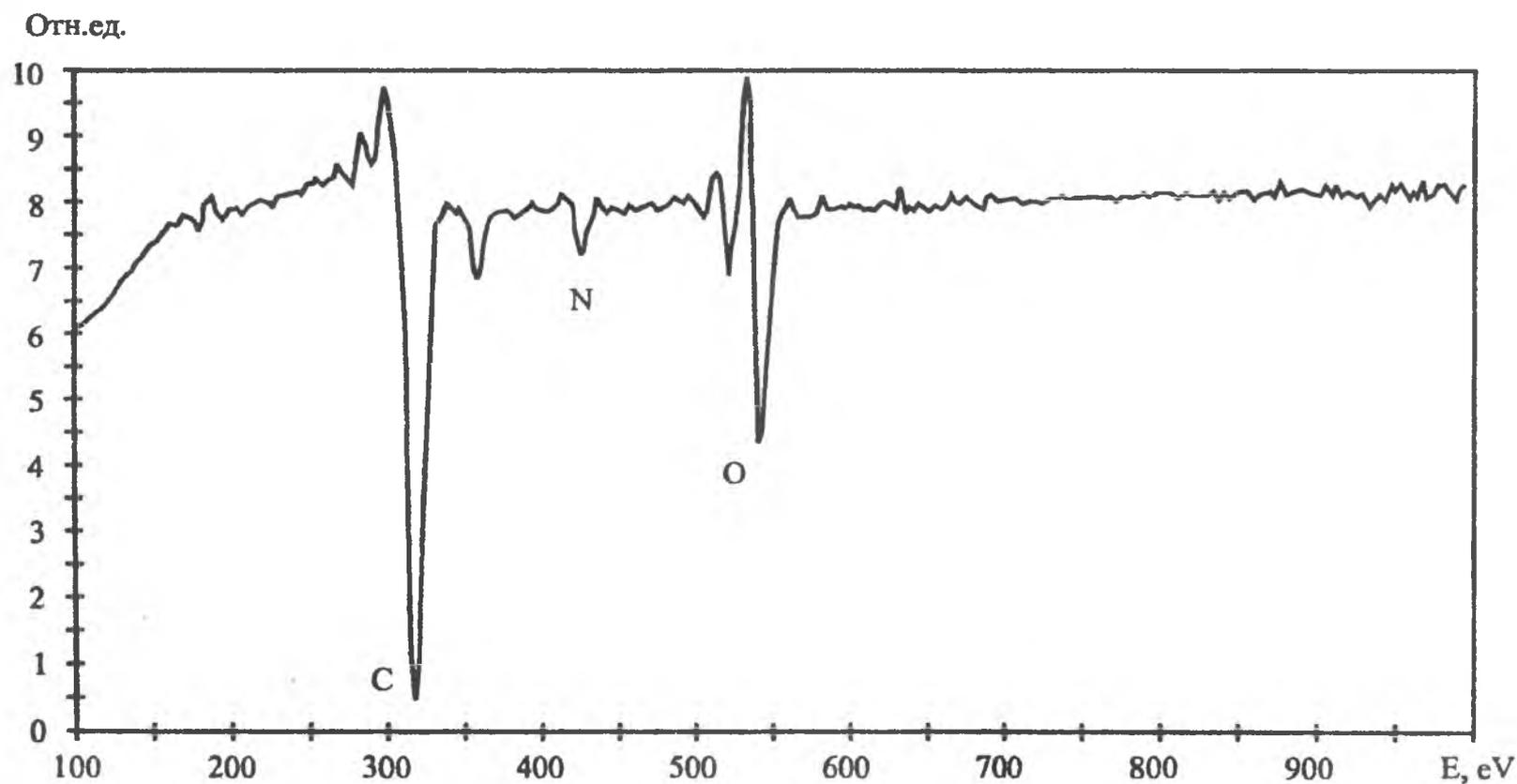


Рис. 7.13. Оже-спектр волокнистого материала, полученного осаждением никеля на модифицированные ПАН волокна

Поэтому для определения кобальта в материале использовался метод рентгенофлуоресцентного анализа, основанного на регистрации оптического излучения образца, возбуждаемого рентгеновскими лучами [385]. Исследования проводили на установке JVAR (Jordan Valley Applied Radiation), параметры процесса: ток излучателя – 400 мкА, ускоряющее напряжение – 12 кВ, диапазон

детектирования энергий возбужденного характеристического излучения – 0 –10 кэВ, рабочая атмосфера - воздух. Обнаружение кобальта проводилось методом сравнения излучения образца композиционного волокнистого материала с излучением тестового образца металлического кобальта.

Анализ спектров флуоресцентного излучения (рис. 7.14) показывает присутствие ярко выраженных максимумов на энергиях, соответствующих кобальту. Наличие низкоинтенсивных пиков и шума обусловлено наличием в образце и рабочей атмосфере примесей и загрязнений, а также шумовыми характеристиками детекторной секции установки.

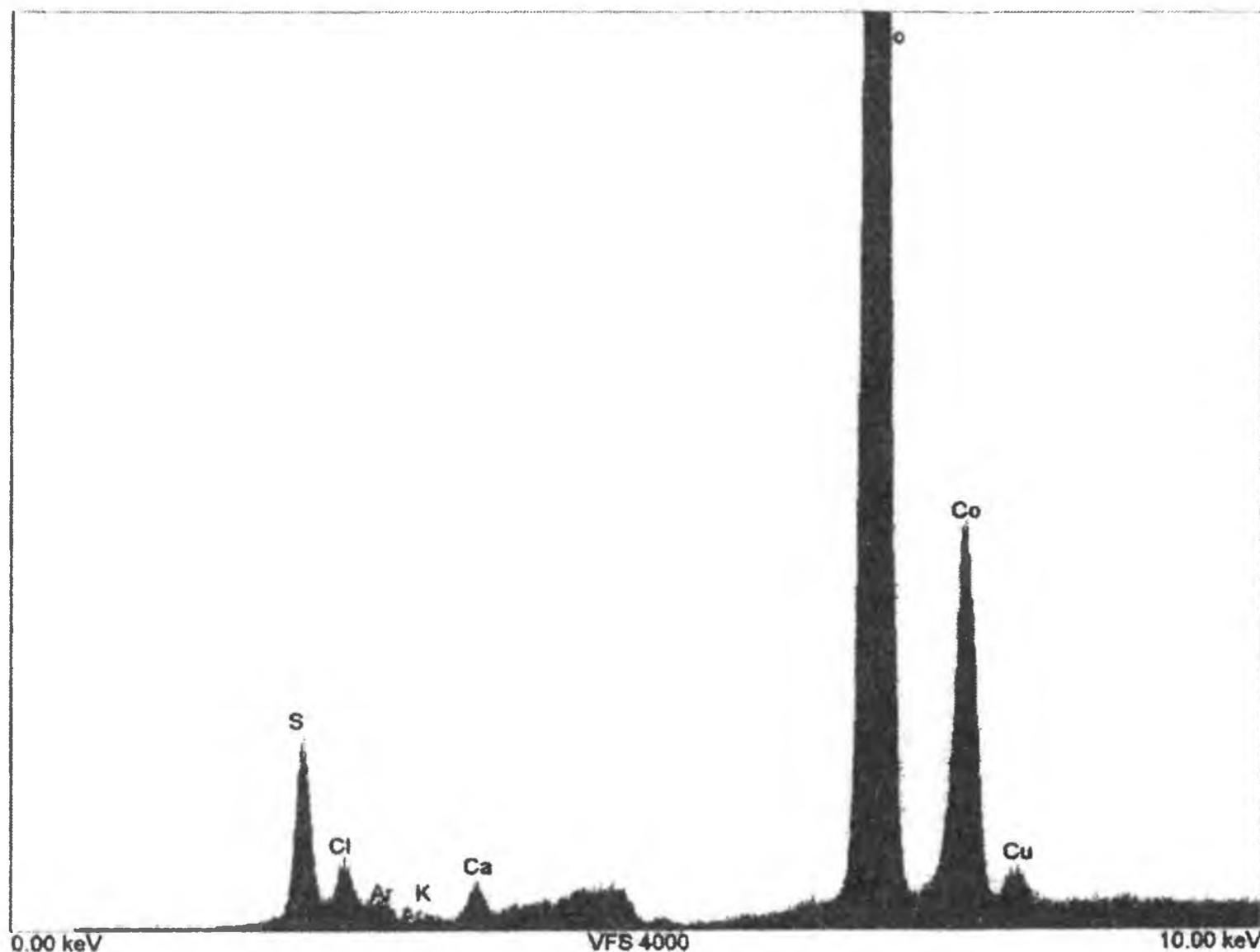


Рис. 7.14. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа материала, полученного осаждением кобальта на модифицированные ПАН волокна

Рентгеноструктурные исследования, проведенные на установке ДРОН 3.0 с использованием $Co_{K-\alpha}$ излучения, показали, что никель- и кобальтсодержащие материалы обладают сходной структурой и являются металл полимерными комплексными соединениями (рис. 7.15).

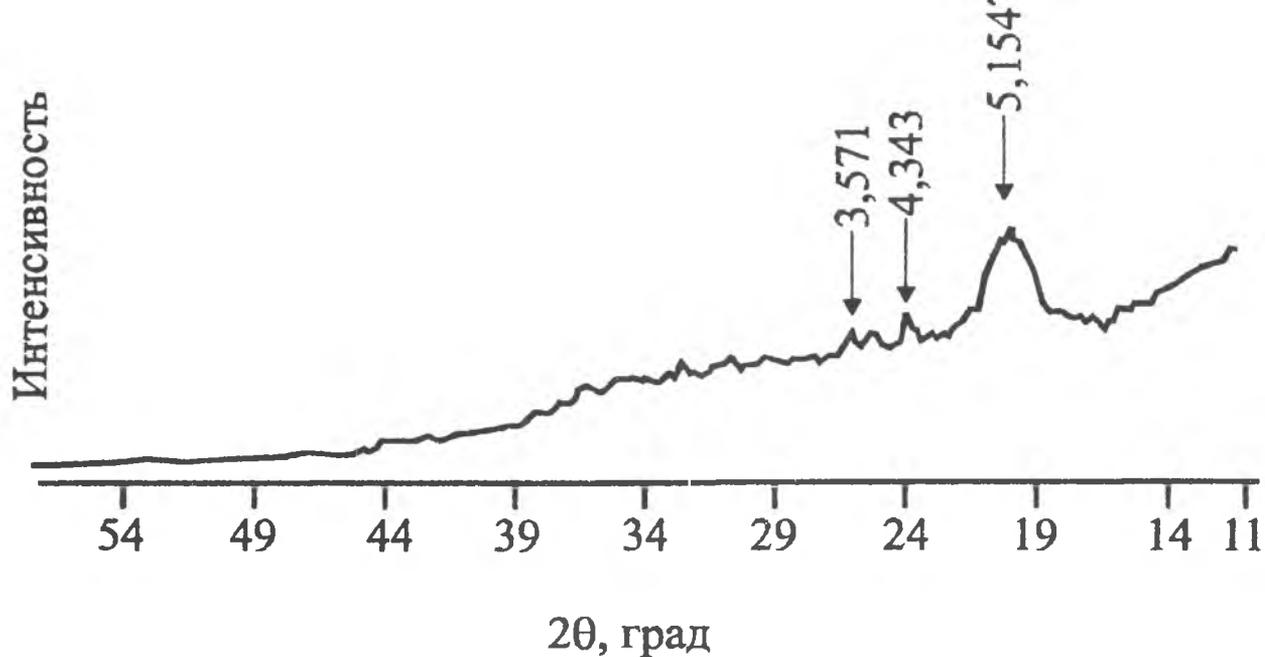


Рис. 7.15. Дифрактограмма материала после химического осаждения кобальта на модифицированные ПАН волокна

7.2.5. Совместное осаждение сплавов Ni-Co и Ni-Fe

С помощью сорбционной технологии возможен синтез не только композитов, содержащих ионы одного d-металла, но и совместное осаждение нескольких веществ.

Методами рентгенофлуоресцентного анализа показано, что при осаждении металлов из водного раствора солей происходит их совместное осаждение, и синтезируются материалы, содержащие никель с кобальтом и никель с железом.

Методика синтеза таких материалов аналогична описанной выше для никеля и кобальта. Отличие заключается в использовании на стадии осаждения металла из водного раствора смеси растворов солей осаждаемых металлов. Для формирования никель-кобальтового и никель-железного материала использовался раствор, в котором содержание ионов никеля по отношению к ионам кобальта или железа было 80:20%. Осаждение проводилось при температуре 70⁰С. Наблюдались характерные признаки реакции осаждения металлов из водных растворов: ее автокаталитический характер, необходимость инициирования процесса восстановления, зависимость скорости реакции от температуры процесса и ограничение количества осаждаемого металла.

В процессе осаждения окраска материала волокна приобретала зелено-черный цвет при осаждении сплава кобальт-никель и коричневый оттенок в случае соосаждения никеля с железом.

Из результатов анализа элементного состава (проведенного на рентгенофлуоресцентной установке БРА-15-03) синтезированных материалов видно, что металлы присутствуют в соотношениях, отличных от соотношений ионов в растворах для осаждения. Относительное содержание каждого элемента в сплаве можно определить по отношению интенсивностей соответствующих пиков. В сплаве присутствует примерно 17 % кобальта и 14 % железа (рис. 7.16 и 7.17). Этот факт говорит о том, что осаждение никеля происходит с большей скоростью, чем других

металлов, что связано с предварительной сорбцией никеля и использованием восстановленных частиц в качестве каталитических центров последующего осаждения.

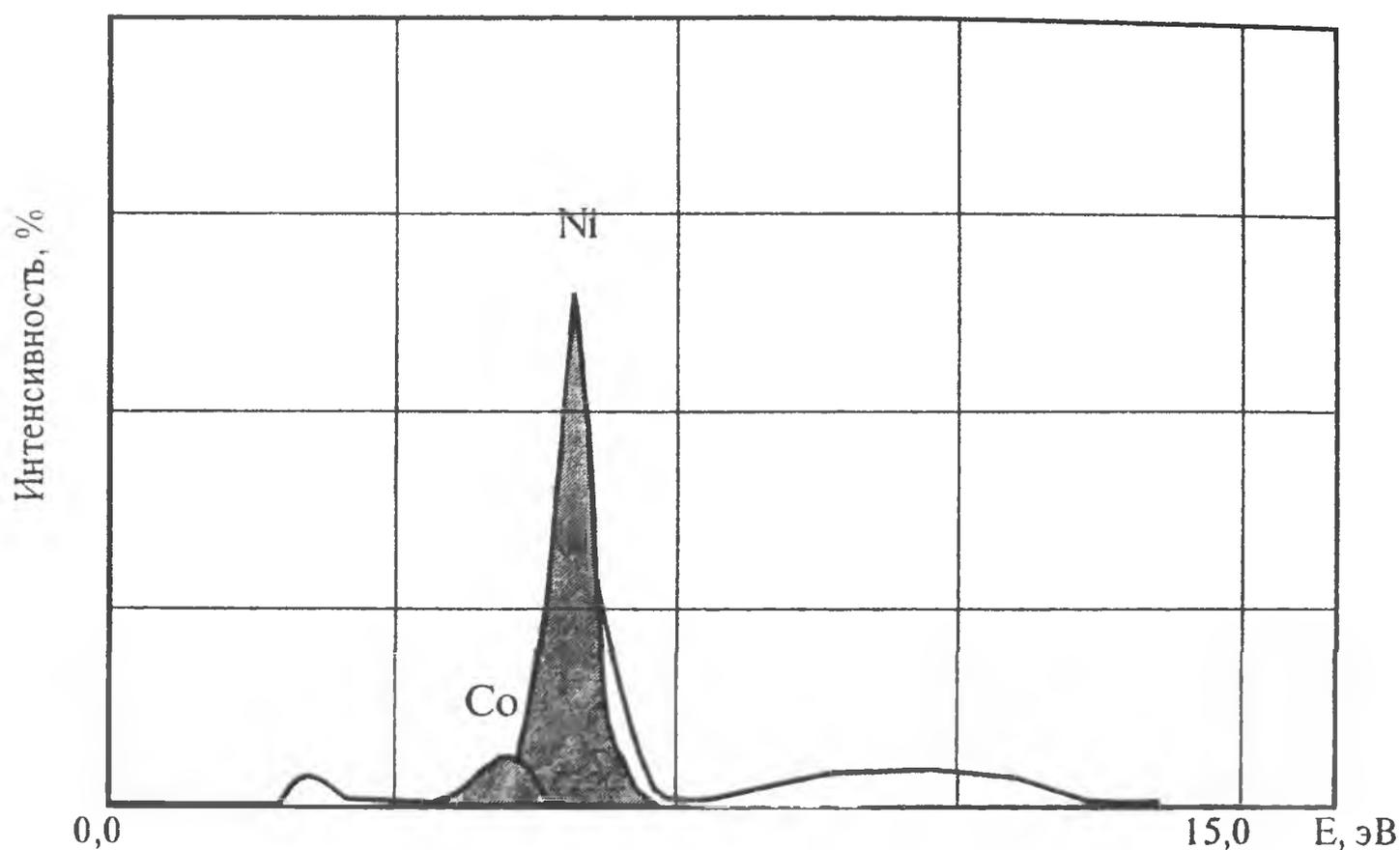


Рис. 7.16. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа волокнистого материала, полученного совместным осаждением никеля и кобальта

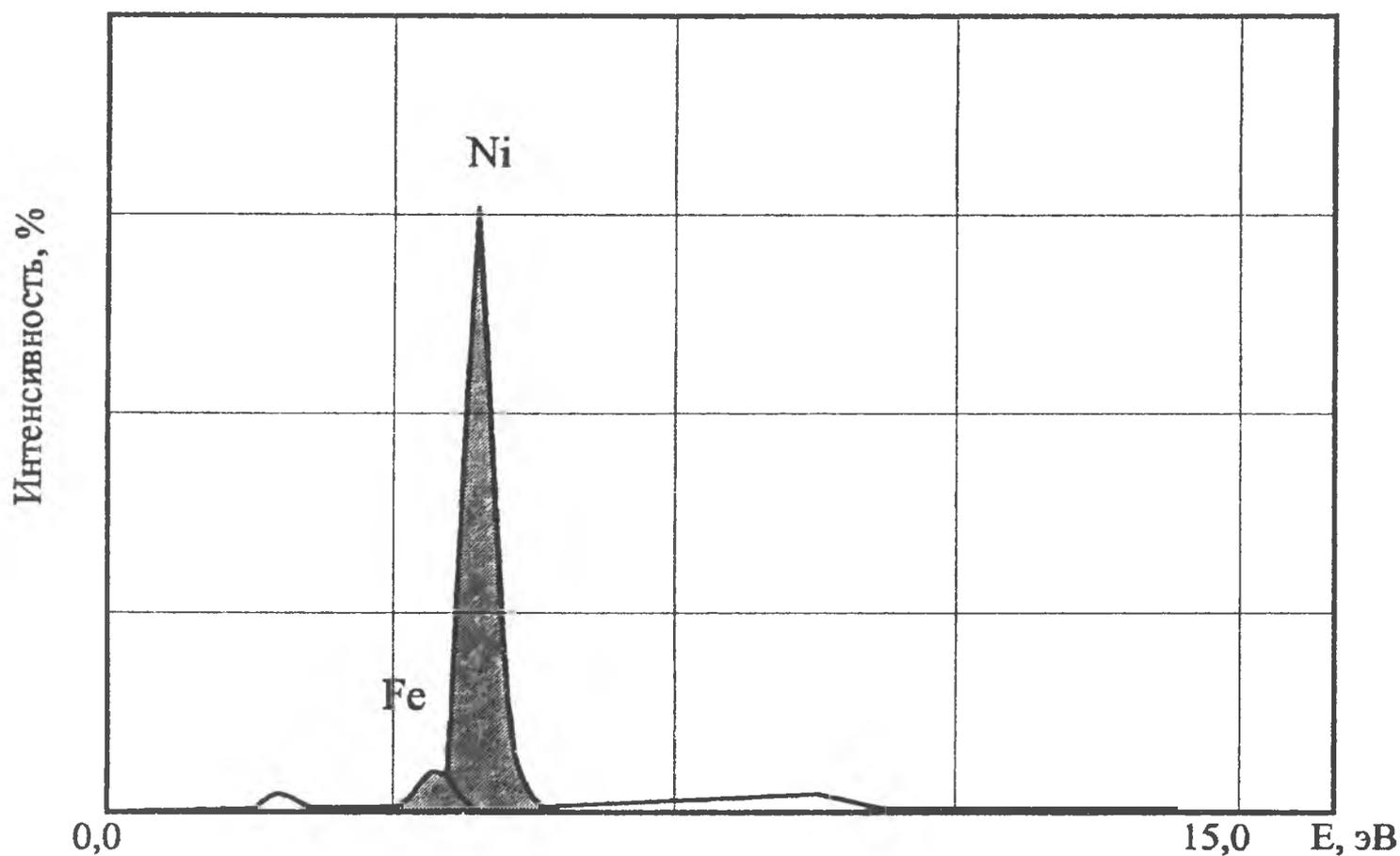


Рис. 7.17. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа волокнистого материала, полученного совместным осаждением никеля и железа

7.3.1. Методика исследования электрических свойств

На радиоматериалы в процессе эксплуатации воздействуют электрическое и магнитное поля, как отдельно, так и в совокупности. Одним из основных свойств вещества по отношению к электрическому полю является его электропроводность. Электрофизические свойства материалов обычно характеризуются удельной электрической проводимостью и удельным электрическим сопротивлением, связанных соотношением:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}, \quad (6.19)$$

где ρ - удельное электрическое сопротивление, Ом·м;

γ - удельная электрическая проводимость, См/м.

Электропроводящие свойства синтезированных материалов оценивались по удельному электрическому сопротивлению полотен, которое определялось двухконтактным методом с помощью универсального вольтметра В7-21А. При проведении измерений, после предварительной калибровки для устранения влияния собственного сопротивления проводников измерительного тракта, квадратный образец полотна площадью 1 см² закреплялся между измерительными электродами, и проводилось измерение сопротивления материала. Величина удельного сопротивления получена пересчетом через геометрические параметры образца по следующей формуле [386]:

$$\rho = R \frac{S}{d}, \quad (6.20)$$

где R – сопротивление образца, Ом;

S – площадь электродов и образца, м²;

d – толщина образца (расстояние между электродами), м.

При определении электропроводности материалов с высоким сопротивлением было необходимо использовать трехконтактный метод, позволяющий измерять удельное поверхностное и объемное электрическое сопротивление. Общее удельное сопротивление определялось путем измерения поверхностной и объемной проводимости, их суммирования и нахождения обратной величины [387].

7.3.2. Электрические свойства металлосодержащих волокнистых материалов

Модифицирование материалов волокон приводит к изменению их химических и физических свойств. Введение атомов и ионов других химических элементов и изменение структуры материала также оказывает значительное влияние на микроскопические и макроскопические характеристики волокон.

Синтезированные волокнистые материалы, содержащие никель и кобальт, в отличие от исходных и модифицированных полиакрилонитрила и хлопка, обладают весьма значительной (на несколько порядков больше, чем у исходного материала) электропроводностью и начинают обладать поглощающими электромагнитное излучение свойствами.

По изменению электрофизических свойств можно оценить структурные превращения, происходящие в веществе. Ухудшение электропроводности обуславливается окислением синтезированных материалов кислородом воздуха, взаимодействием с парами воды, структурными перестройками вещества.

Синтезированные материалы, содержащие наноразмерные металлические или металлоорганические кристаллиты, проявляют повышенную химическую активность и окисляются кислородом воздуха или непосредственно во время сушки или в течение нескольких часов после синтеза.

Двухконтактным методом были исследованы электропроводящие свойства материалов, полученных химическим осаждением никеля из водного раствора с использованием палладия в качестве катализатора, и никель- и кобальтсодержащих материалов, синтезированных в результате последовательных реакций ионного обмена и восстановления.

Первоначально исследовались образцы трикотажного полотна, сформированного из модифицированного полиакрилонитрила. Активация подложки осуществлялась с помощью хлористого палладия, а осаждение проводилось из гипофосфитного раствора.

Удельная электрическая проводимость материалов, полученных по стандартной "палладиевой" методике, зависит от времени осаждения (рис. 7.18).

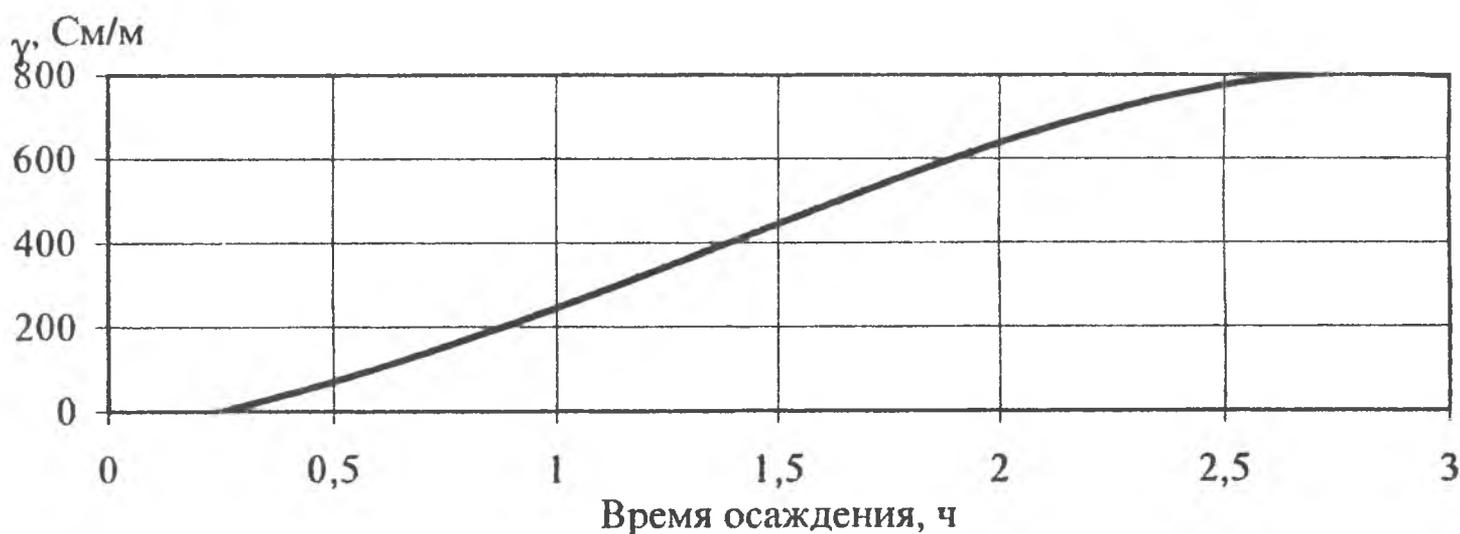


Рис. 7.18. Зависимость удельной электропроводности материала от времени осаждения металлического никеля (катализатор палладий)

На начальном этапе осаждения осадок формируется на каталитических центрах, создаваемых атомами палладия, поэтому при малых временах осаждения электропроводящие свойства у волокон не наблюдаются. Затем происходит срастание островков осадка, и образуются мостики проводимости. При увеличении их числа увеличивается эквивалентное поперечное сечение проводящего металла, и соответственно проводимость начинает увеличиваться. S-образный характер кривой обусловлен прежде всего ограниченным количеством осаждаемого металла. При достижении массовой доли никеля 25 % и более на поверхности волокна образуется металлический осадок, а волокно становится хрупким и теряет свои гибкие свойства.

При исследовании электрофизических характеристик волокнистых металлосодержащих материалов, полученных методом сорбции ионов металлов с последующим восстановлением, двухконтактным методом было установлено, что их электропроводность заметно уменьшается в течение короткого промежутка времени (0,5-5 ч) непосредственно после окончания синтеза (рис. 7.19).

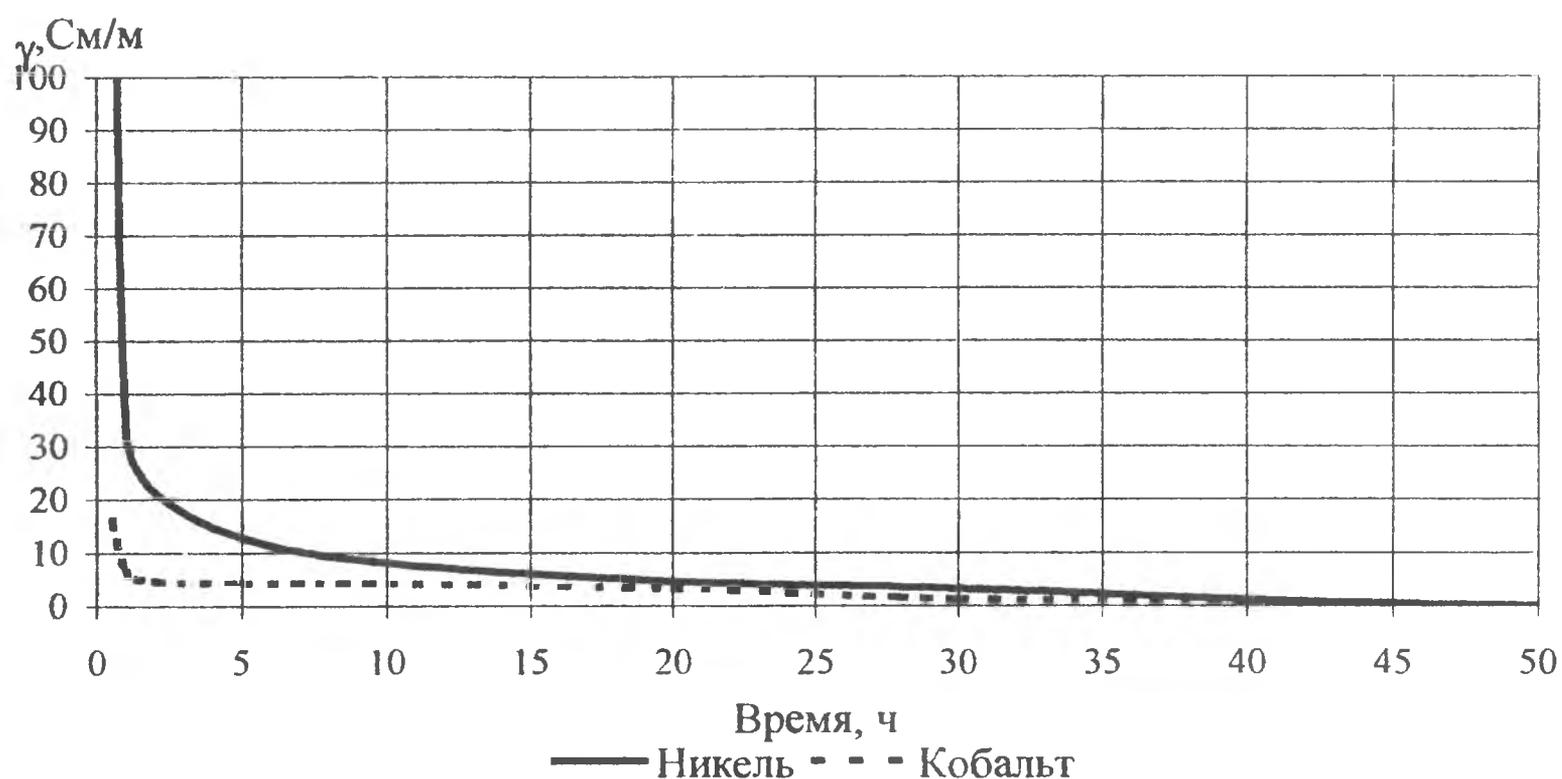


Рис. 7.19. Зависимость удельной электропроводности синтезированных металлосодержащих материалов от времени

Удельное электрическое сопротивление материалов при содержании никеля 15 мг/см^2 полотна (17 % масс) достигает величины $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, но затем увеличивается по логарифмическому закону. Начальное сопротивление кобальтсодержащих материалов не превышает величины $50 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Наблюдаемое различие в начальных уровнях электропроводности для материалов, содержащих одинаковое количество никеля или кобальта, объясняется различной степенью дисперсности осаждаемых металлов, что подтверждается результатами электронной микроскопии. Так, при осаждении кобальта образуются более мелкие

металлсодержащие кристаллиты, с большим электрическим сопротивлением, чем у кристаллического никеля.

Зависимость удельной электропроводности от времени условно можно разделить на два участка: резкое уменьшение проводимости по обратному логарифмическому закону и выход характеристики на участок с насыщением, когда проводимость стремится к величине, характерной для диэлектриков. Такое резкое изменение сопротивления на начальном этапе определяется очень быстрым первоначальным окислением материала, на которое практически не оказывает влияние температура, а также свойства материала [388]. С увеличением времени окисления скорость роста оксида может уменьшиться настолько, что будет практически равна нулю. Таким образом, оксидная пленка быстро приобретает некоторую предельную толщину, мало меняющуюся со временем. Логарифмический закон окисления характерен для очень тонких пленок, что и подтверждает в нашем случае наличие активных кластеров очень малых размеров. При выходе на линейный участок кривой скорость окисления уже лимитируется процессами на поверхностях раздела, в частности, процессом диффузии кислорода через оксидную пленку.

Таким образом, после окончания синтеза происходит взаимодействие сформированных наноразмерных металлсодержащих кластеров с кислородом воздуха, причем на данном этапе лимитирующим процессом оказывается транспорт кислорода через оксидную пленку к реакционным центрам.

7.4. Методика стабилизации электрических свойств металлсодержащих волокнистых материалов

Ухудшение электропроводящих свойств металлсодержащих волокон связано с взаимодействием синтезированных материалов с кислородом воздуха. Окисление может быть предотвращено путем удаления одного из реагентов (кислорода) с границы раздела фаз (материал – воздух). Известные методы хранения ультрадисперсных и кластерных материалов в вакууме или атмосфере инертного газа являются неприемлемыми для синтеза материалов, условиями эксплуатации которых являются комнатные или атмосферные климатические условия, характеризующиеся определенным химическим составом воздуха, температурой, влажностью и т.д.

Одним из способов изоляции одного из реагирующих веществ является обработка поверхностно-активным веществом (ПАВ), образующим оболочку вокруг защищаемого объекта. Высокомолекулярные ПАВ широко распространены как стабилизаторы природных и синтетических дисперсных систем. Все оболочки, состоящие из высокомолекулярных соединений, можно разделить на две группы, отличающиеся структурой и свойствами: проницаемые и непроницаемые. К первой группе относятся оболочки природных систем, желатин, сапонин, поливиниловые спирты и др. Оболочки второго типа можно получить, используя некоторые органические масла, кислоты, предельные углеводороды [389]. Теоретически любое

химическое соединение, имеющее в молекуле гидрофильные и гидрофобные участки, будет поверхностно-активным.

При синтезе металлосодержащих волокнистых материалов происходит восстановление металла до нуль-валентного состояния и образование связей с молекулами полимера. При этом в атомах никеля или кобальта имеются электронные вакансии на d-орбитали, которые легко занимают кислородом воздуха. Основная идея разрабатываемого метода стабилизации характеристик заключается в замещении кислорода на часть молекулы поверхностно-активного вещества и изоляции зоны реакции окисления от внешнего кислорода. Следовательно, слой ПАВ должен создавать поверхность, препятствующую диффузии веществ из окружающей среды.

ПАВ могут стабилизировать дисперсные системы, придавая им устойчивость, либо путем образования мономолекулярных адсорбционных слоев, препятствующих коалесценции, либо путем образования в непрерывной фазе вокруг капелек высоковязких растворов, препятствующих сближению капелек и как бы "замуровывающих" их в высоковязкой среде. При этом ПАВ должно обеспечивать требуемую устойчивость системы, стабилизировать нужное количество дисперсной фазы в среде, и количество ПАВ, необходимое для стабилизации, должно быть минимальным.

Методика стабилизации кластерной структуры синтезированных материалов включает в себя сушку в ацетоне и последующую обработку материала водными и неводными растворами высокомолекулярных ПАВ. Чтобы не допустить окисления металла в процессе отмычки материала водой от избытка электролита, производилось обескислороживание промывной воды, а затем выполнялась ацетоновая сушка материала. На всех стадиях в жидкость для отмычки добавлялись ПАВ, чтобы осуществить одновременную их сорбцию и создать защитный слой.

Создание защитного слоя должно сопровождаться наименьшими материальными затратами и связано с применением широко распространенных реактивов. На первом этапе исследовалась стабилизация кластеров с помощью ОС-20, который является хорошим пенообразователем и обладает гидрофильными свойствами. Добавление на последней стадии синтеза и при промывке пенообразующего ПАВ привело к диспергации и стабилизации коллоидного раствора, образующегося в результате восстановления ионов никеля или кобальта в водном растворе, а также к созданию на поверхности синтезируемого материала защитной пленки.

При исследовании эффективности стабилизации материалов ОС-20 было установлено, что критическое влияние на защитные свойства абсорбированного слоя поверхностно-активного вещества оказывает наличие в окружающей атмосфере паров воды (рис. 7.20).

Исследования проводились сравнением электрофизических свойств двух образцов, один из которых выдерживался на воздухе, а второй – в обезвоженной атмосфере, созданной в эксикаторе с помощью силикагеля.

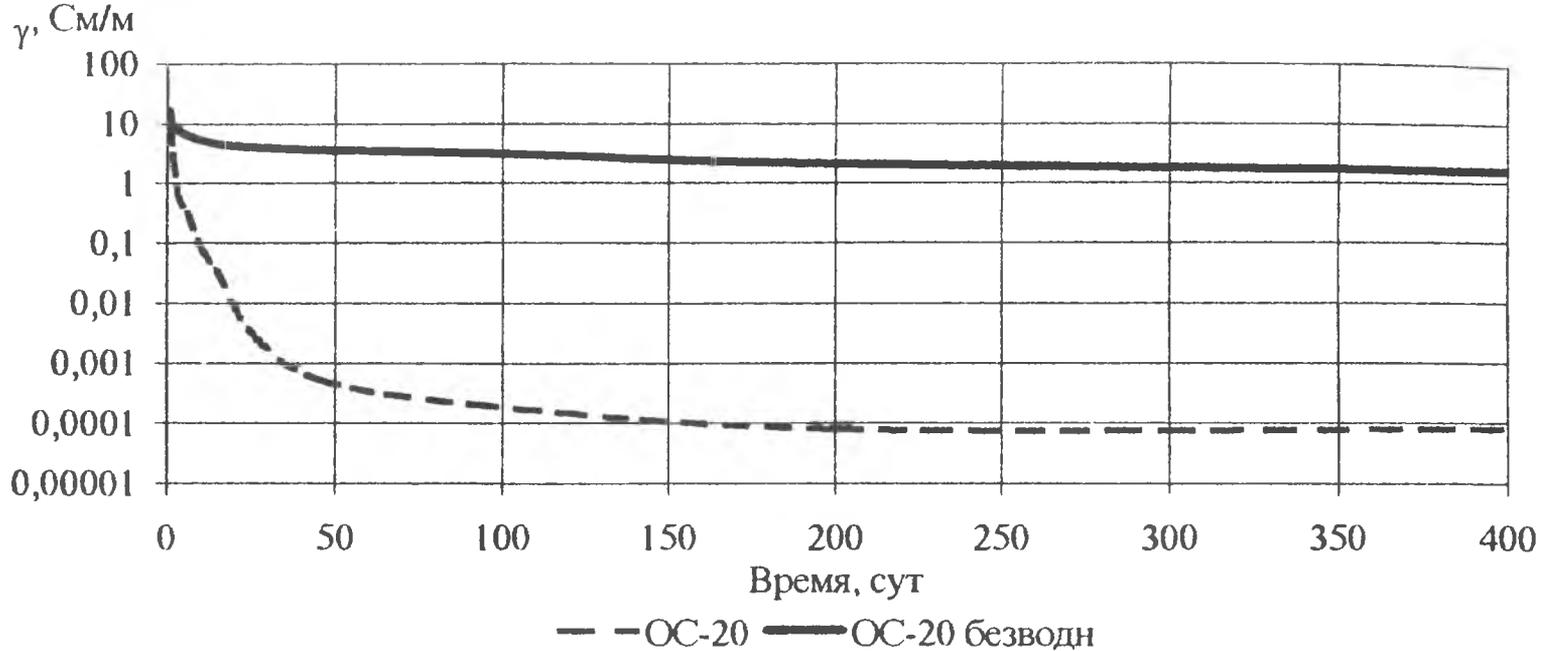


Рис. 7.20. Влияние паров воды на эффективность стабилизации проводимости никельсодержащих волокон с помощью ОС-20

Механизм окисления металлсодержащих материалов связан с образованием электролитной системы в поверхностном слое материала. Молекулы воды адсорбируются слоем ПАВ, создавая пути для транспорта молекул кислорода к реакционным центрам. В связи с этим были проведены исследования эффективности стабилизации синтезированных частиц другими ПАВ. Молекулы вещества должны иметь клиновидную форму таким образом, чтобы диаметр части, находящейся в непрерывной фазе, был больше, чем в дисперсной фазе.

Поэтому в качестве стабилизирующих поверхностно-активных веществ были выбраны высокомолекулярные и низкомолекулярные гидрофобные органические соединения – силиконовое масло и бутиловый спирт [390]. Сушка обработанных ПАВ образцов проводилась при температуре 50⁰С в сушильном шкафу. Исследования элементного состава, проведенные на рентгенофлуоресцентном анализаторе JVAR, показали, что после обработки материала силиконовым маслом в спектре появляется характерный для Si пик, следовательно, происходит сорбция ПАВ (рис. 7.21).

Проведенные исследования позволили установить, что наиболее эффективной является стабилизация бутиловым спиртом. Стабилизация высокомолекулярным маслом также достаточно эффективна, однако полученные образцы имеют более длительный период выхода на постоянное значение электропроводности. Из кинетических кривых изменения удельной электропроводности видно, что переходный период составляет нескольких суток, что связано с удалением остатков кислорода, образованием связей с поверхностно-активным веществом и образованием защитного слоя. Для веществ с большей молекулярной массой и, следовательно, большим размером молекул этот процесс является более сложным и длительным, приводящим не только к изоляции материала от кислорода воздуха, но и капсуляции отдельных кластеров, что отражается в уменьшении величины проводимости.

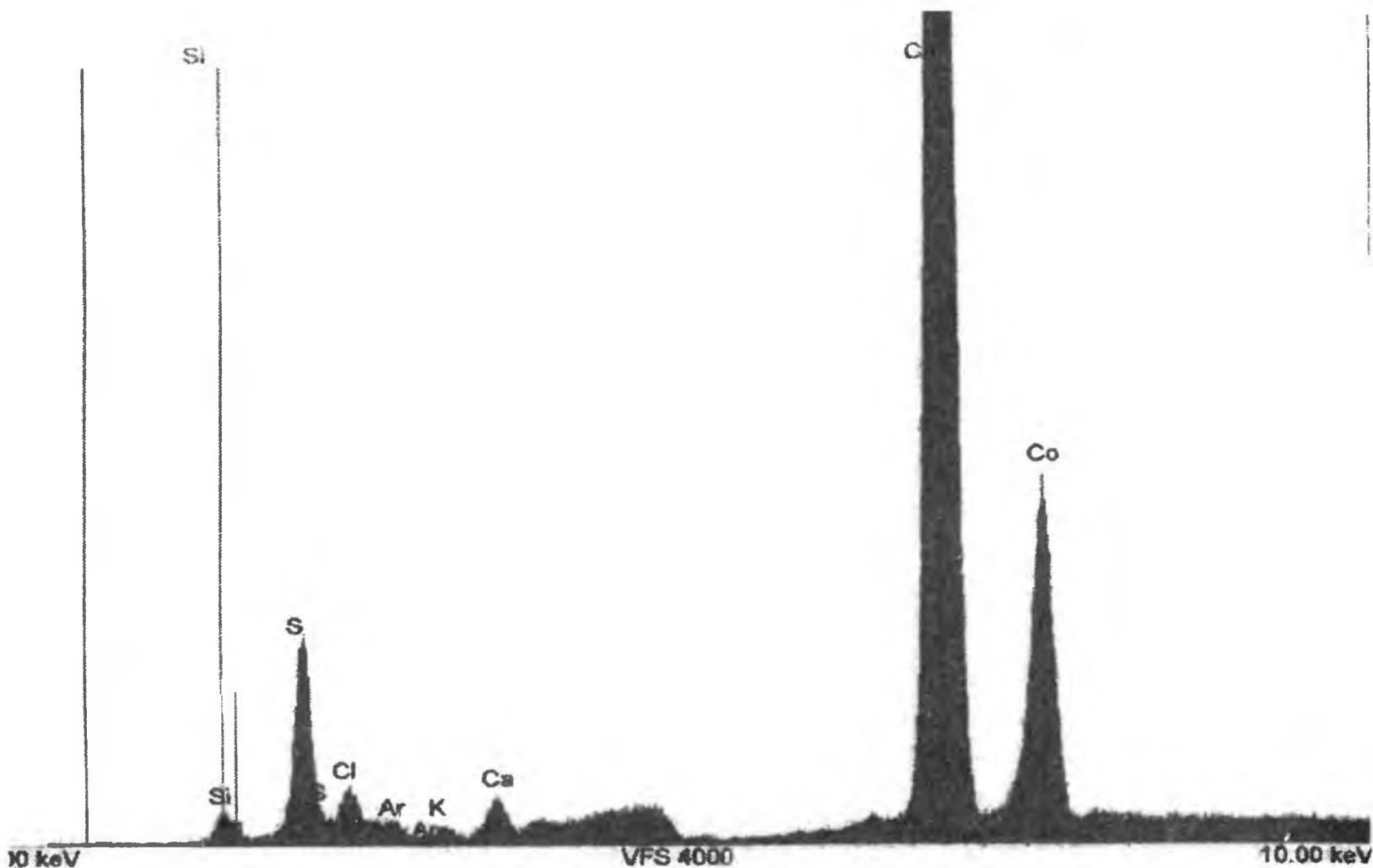


Рис. 7.21. Результаты рентгенофлуоресцентного анализа кобальтсодержащего волокнистого материала после сорбции силиконового масла

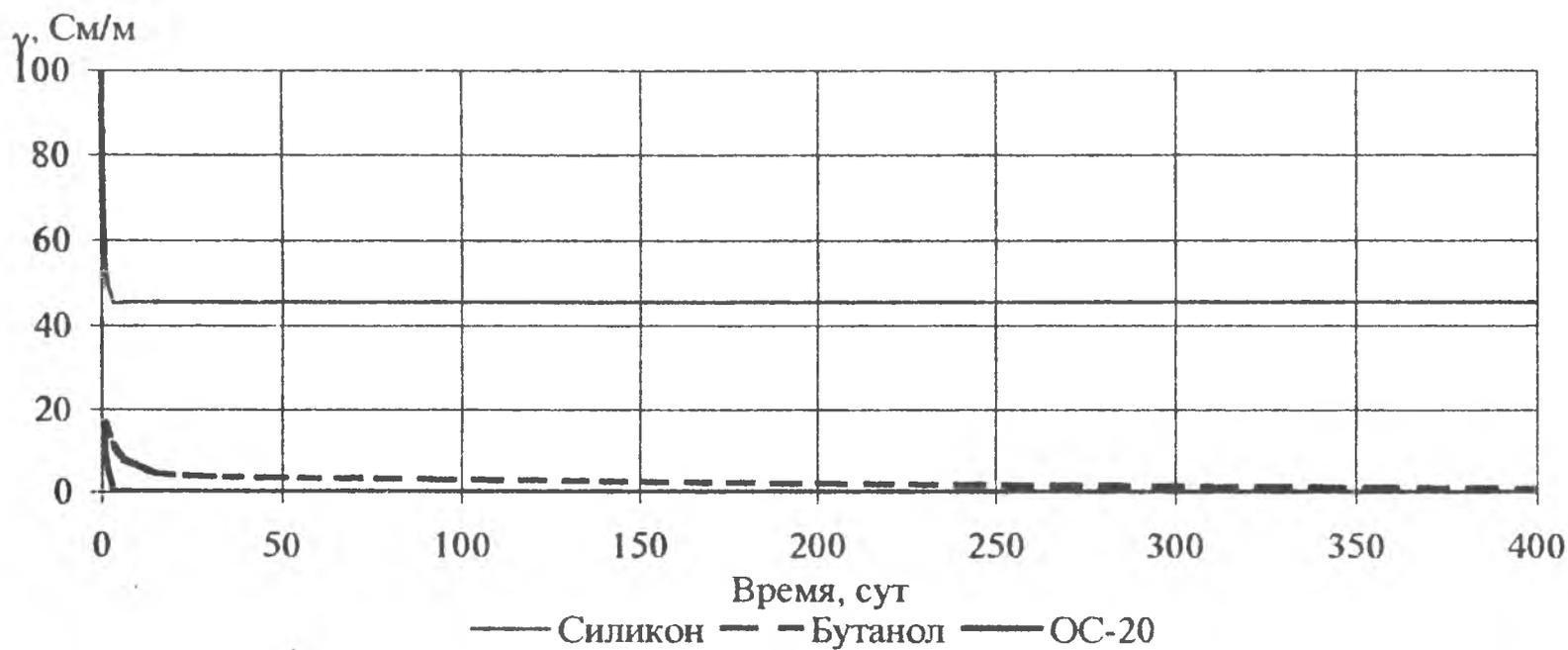


Рис. 7.22. Эффективность стабилизации проводящих свойств никельсодержащих волокон различными ПАВ

Гидрофобная часть молекул ПАВ препятствует влиянию паров воды, содержащихся в воздухе, вследствие чего синтезированные материалы обладают низкой смачиваемостью. Однако существуют ограничения, связанные с температурной стабильностью материалов. В этом случае более предпочтительными являются способы создания других защитных пленок из оксидов тугоплавких металлов по золь-гель технологии [391].

8.1. Экранирующие свойства полотен на основе синтезированных волокнистых материалов

8.1.1. Особенности методики исследования радиопоглощающих характеристик полотен

При исследовании радиопоглощающих материалов, актуальным становится определение энергии излучения, отраженной от экрана и поглощенной в его объеме. Исходя из предположения, что падающая электромагнитная волна частично отражается от передней границы раздела, частично затухает в объеме экрана и частично проходит через экран, и, воспользовавшись соотношениями для коэффициента отражения и передачи [392], получим, что мощность излучения, поглощаемого в материале, определяется как:

$$P_{\text{погл}} = P_{\text{пад}} - P_{\text{отр}} - P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}}(1 - |\Gamma|^2 - |S_{21}|^2), \quad (8.1)$$

где $P_{\text{пад}}$, $P_{\text{отр}}$, $P_{\text{погл}}$, $P_{\text{прош}}$ – мощность падающего, отраженного, поглощенного и прошедшего через экран ЭМИ, соответственно,

Γ – коэффициент отражения,

S_{21} – коэффициент передачи.

Если общая эффективность экрана высока, и, следовательно, коэффициент прямой передачи мал, то ее можно разложить на две составляющие – подавление ЭМИ за счет отражения и за счет поглощения электромагнитной волны. В этом случае эффективность за счет отражения и эффективность за счет поглощения связаны соотношением:

$$\mathcal{E}_{\text{погл}} = \mathcal{E}_{\text{общ}} - \mathcal{E}_{\text{отр}} = \mathcal{E}_{\text{общ}}(1 - |\Gamma|). \quad (8.2)$$

С учетом соответствия коэффициента отражения и эффективности экранирования S-параметрам пассивных четырехполосников, результаты испытания трикотажных экранирующих полотен могут быть представлены следующим образом:

общая эффективность экранирования – величина, обратная модулю коэффициента прямой передачи S_{21} ,

коэффициент отражения – модуль коэффициента отражения S_{11} ,

эффективность экранирования за счет поглощения – величина определяемая по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{погл}} \approx |S_{21}|(1 - |S_{11}|). \quad (8.3)$$

При этом доля поглощенного ЭМИ в процентах равна $(1 - |S_{11}|) \cdot 100\%$.

Для оценки характеристик радиопоглощающих полотен удобно представлять эффективность конструкции и уровень поглощаемого ЭМИ на одном графике. Недостатком такого представления является расхождение результатов с реальными при исследовании конструкций с низкой эффективностью, когда значительный уровень мощности прошедшего через экран излучения учитывается как поглощенная энергия. Однако такое представление является наиболее показательным для характеристики радиопоглощающих материалов и покрытий.

8.1.2. Экранирующие свойства никельсодержащих материалов

Исследовали экспериментальные образцы материалов, представляющие собой отрезки трикотажных полотен из полиакрилонитрила и хлопка, на которые производили химическое осаждение никеля. Измерения характеристик материалов выполнены по методике и на оборудовании.

Трикотажные полотна из полиакрилонитрила сформированы комбинированным переплетением ластик-производная гладь, а из хлопка – простой гладью. Производили химическую обработку отрезков полотен для модифицирования материала образцов, а затем осаждали никель из водного раствора сернокислого никеля на каталитические центры, полученные путем сорбции в одном случае ионов палладия, а во втором – ионов осаждаемого металла, с последующим их восстановлением.

Осаждение проводили в течение не менее 30 минут для достижения высокой удельной проводимости, связанной с концентрацией осаждаемого материала. Экспериментальные исследования материалов после выдержки на воздухе и уменьшения сопротивления до уровня 1 МОм·м показали, что они не обладают способностью подавлять ЭМИ (ведут себя аналогично исходному материалу и являются радиопрозрачными) в диапазоне частот от 1,5 до 37 ГГц. Подавляющие свойства таких материалов начинают незначительно проявляться только на частотах выше 100 ГГц, что связано с диэлектрическими потерями в материале и оказываются аналогичными характеристикам диэлектрических материалов.

Основное внимание было уделено материалам, которые непосредственно после осаждения обрабатывали ПАВ для стабилизации электрических параметров и имеющим удельное сопротивление порядка $2-3 \cdot 10^{-2}$ Ом·м и ниже.

В результате проведенных экспериментов было показано, что материалы, синтезированные с использованием хлористого палладия и путем сорбции ионов никеля обладают экранирующими свойствами, причем эффективность экранирования повышается с увеличением частоты ЭМИ (рис. 8.1). Измерения на частотах 0,1-1000 МГц представляют собой определение параметров ЭМП в ближней зоне, поэтому проводились измерения как электрической, так и магнитной

составляющих, для чего использовали антенные приемники соответствующих типов. Эффективность подавления магнитной составляющей ЭМП оказалась не превышающей нескольких децибел, что обусловлено малой толщиной полотна по сравнению с рабочими длинами волн ЭМИ и слабыми магнитными свойствами материалов. В этом случае происходит подавление в основном электрической составляющей ЭМИ, обусловленное высокой электрической проводимостью материалов. В результате большой разницы волновых сопротивлений открытого пространства и материала образцов происходит отражение электромагнитной волны от границы раздела воздух-полотно. При увеличении частоты происходит уменьшение глубины проникновения поля в материал, поэтому проводящие свойства материала определяются сопротивлением поверхностного слоя, но увеличиваются диэлектрические потери, что обуславливает повышение эффективности экранирования. Кроме того, сокращается радиус ближней зоны, что позволяет проводить измерения напряженности ЭМП и в дальней зоне.

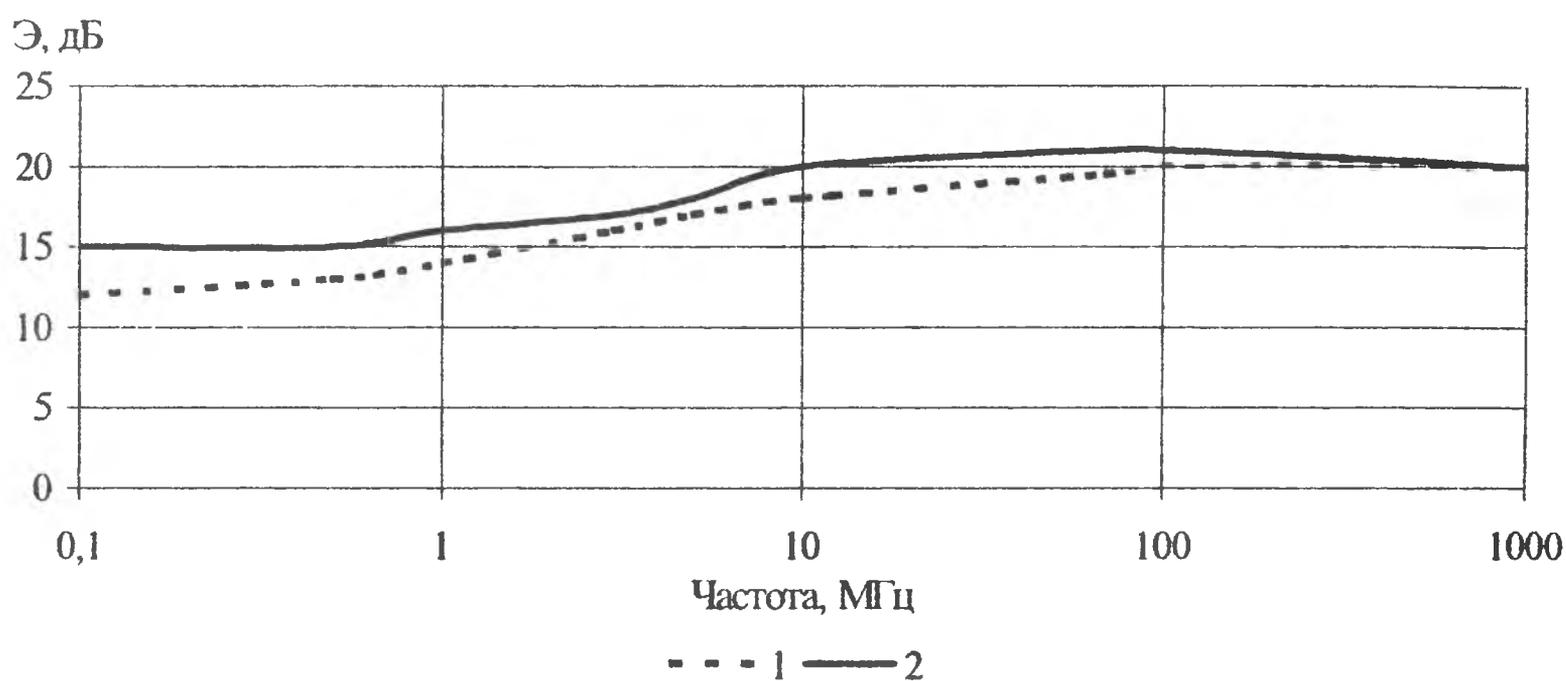


Рис. 8.1. Эффективность подавления ЭМИ никельсодержащими материалами, синтезированными: 1 - по палладиевой методике; 2 - по сорбционной методике

Поэтому в диапазоне свыше 1 ГГц для измерений удобно использовать линейку векторных анализаторов цепей и методику исследования характеристик экранирующих полотен с использованием S-параметров невзаимных пассивных четырехполюсников. Зависимости коэффициента прямой передачи образцов в диапазоне 1-18 ГГц имеет ярко выраженный неравномерный характер, обусловленный особенностями распространения электромагнитных волн этих частот и характеристиками измерительного оборудования (рис. 8.2, 8.3).

При сравнении характеристик материалов, синтезированных по различным методикам, обнаружено, что в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, разница в поведении материалов увеличивается. Материалы, полученные с использованием палладирования, проявляют более высокую эффективность, достигаемую за счет отражения ЭМИ [393]. Такие материалы, содержат

наноразмерные кристаллиты металлического никеля и зависимости эффективности материалов от частоты отличаются характерным для ферромагнитных металлов видом: низким волновым сопротивлением, большой отражательной способностью, высокой эффективностью экранирования [394]. С учетом того, что осажденный металл локализован преимущественно на поверхности волокнистого материала, и толщина поверхностного слоя на частоте 1 ГГц не превышает 0,01 мм, то в этом случае отражающие свойства трикотажного экрана определяются характеристиками границы раздела воздух-материал экрана. Следовательно, отражение ЭМИ происходит за счет взаимодействия с поверхностным слоем, а прошедшая часть энергии частично поглощается в объеме полотна. Так как трикотажное полотно не является монолитным листом материала, то в нем объединяются такие преимущества как высокая эффективность экранирования по сравнению с сетчатыми экранами и высокая гибкость и воздухопроницаемость в отличие от листовых металлических экранов.

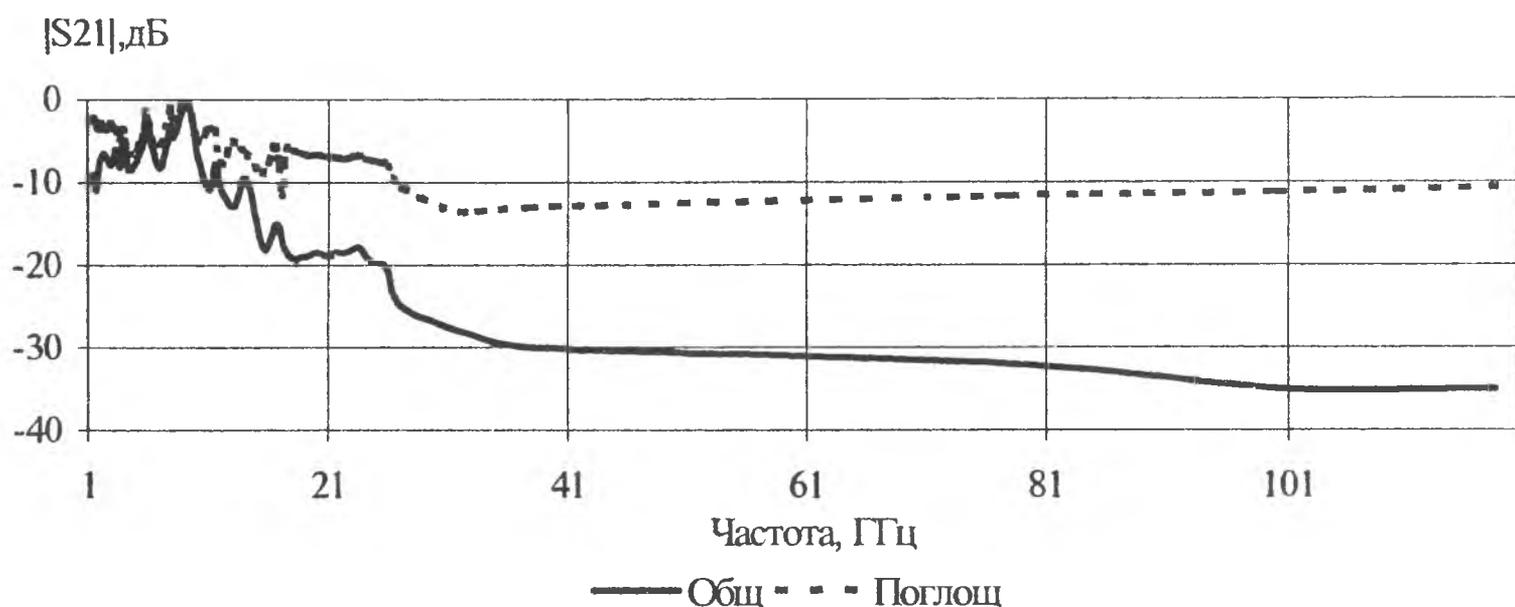


Рис. 8.2. Коэффициент передачи образцов из никельсодержащих материалов, синтезированных по палладиевой методике

Исследование зависимости свойств материала от поляризации падающего ЭМИ проводили путем измерения модуля коэффициента передачи и коэффициента стоячей волны в частотном диапазоне 26,5-37 ГГц. Для этого использовали волноведущую систему прямоугольного сечения, в которой от генератора распространяется плоскополяризованная волна с вертикальной ориентацией вектора напряженности магнитного поля.

Для определения влияния поляризации исследуемый образец, представляющий собой отрезок трикотажного полотна размещали в плоскости, перпендикулярной направлению распространения электромагнитной волны. Измерения коэффициента передачи и коэффициента отражения проводили при различной ориентации петельных столбиков относительно широкой стороны волновода: параллельно, перпендикулярно и под углом 45° (табл. 8.1, 8.2).

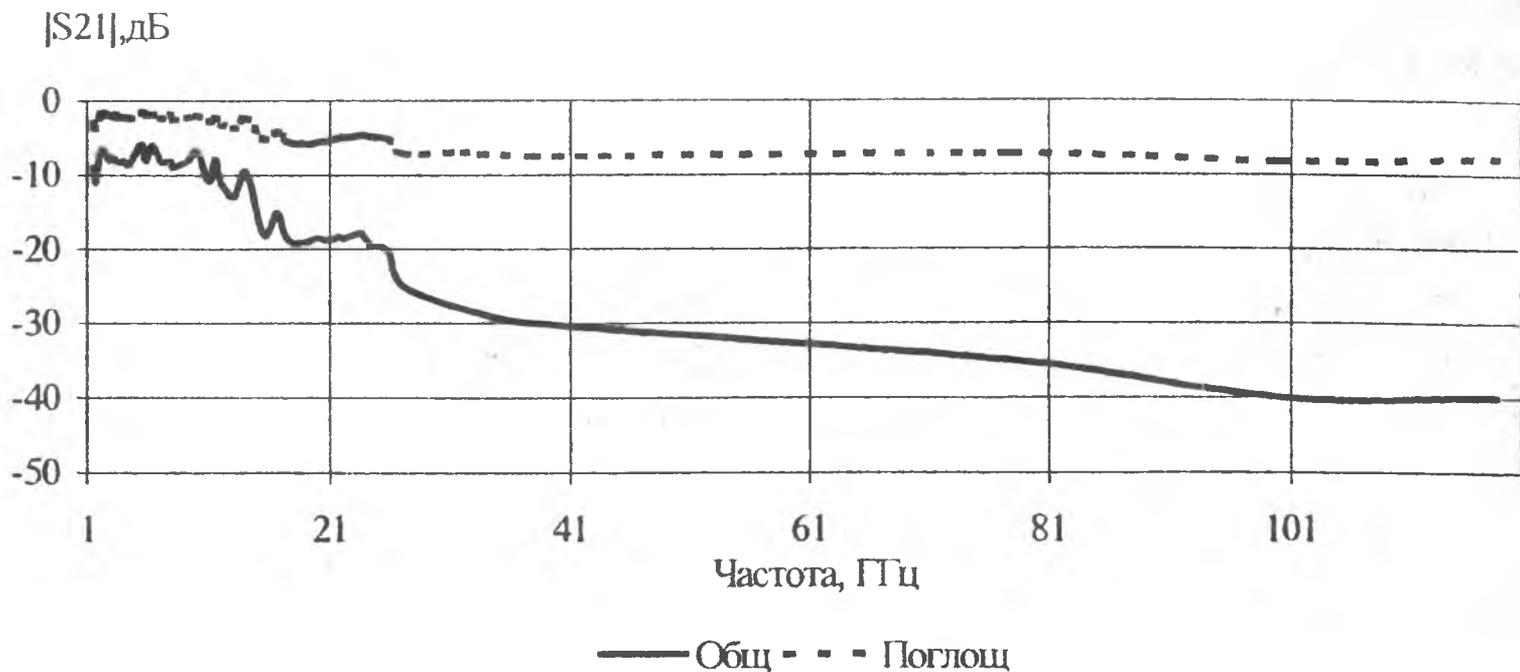


Рис. 8.3. Коэффициент передачи образцов из никельсодержащих материалов, синтезированных по сорбционной методике

Таблица 8.1

Влияние поляризации электромагнитного излучения на эффективность экранирования никельсодержащих волокнистых материалов

| Частота, ГГц | Эффективность экранирования, дБ | | |
|--------------|---------------------------------|-----|-----|
| | 0° | 45° | 90° |
| 26 | 33 | 33 | 32 |
| 30 | 31 | 32 | 32 |
| 34 | 35 | 35 | 36 |
| 37 | 32 | 32 | 32 |

Таблица 8.2

Влияние поляризации электромагнитного излучения на коэффициент отражения никельсодержащих волокнистых материалов

| Частота, ГГц | Коэффициент отражения | | |
|--------------|-----------------------|------|------|
| | 0° | 45° | 90° |
| 26 | 0,44 | 0,44 | 0,49 |
| 30 | 0,43 | 0,41 | 0,50 |
| 34 | 0,35 | 0,29 | 0,33 |
| 37 | 0,37 | 0,33 | 0,33 |

Анализ зависимости эффективности экранирования, определяемой по коэффициенту передачи, и отражающих характеристик материала, позволяют заключить, что материал не является поляризующим на частоте 26,5-37 ГГц, так как

не происходит изменения коэффициентов отражения и передачи экрана, что показывает независимость характеристик материалов от поляризации подающего ЭМИ.

Трикотажные полотна из никельсодержащих волокнистых материалов, сформированных методом сорбции ионов металлов с восстановлением имеют электропроводящую структуру, обусловленную наличием проводящих "мостиков" между атомами никеля, расположенных упорядочено. Эффективность трикотажных полотен из таких материалов ниже, чем металлических листов, однако они обладают меньшим коэффициентом отражения, что при одинаковом значении коэффициента передачи говорит о увеличении уровня поглощаемой мощности ЭМИ. Анализ характеристик образцов позволяет предположить, что уменьшение коэффициента отражения обусловлено рассеянием излучения на металлических центрах внутри материала, а поглощение энергии происходит за счет комплекса диэлектрических и магнитных потерь.

8.1.3. Экранирующие свойства кобальтсодержащих материалов

Исследования экранирующих свойств кобальтсодержащих материалов проводили на экспериментальных образцах, представляющих собой отрезки трикотажных полотен из полиакрилонитрила. Материалы после осаждения кобальта, проводимого путем сорбции ионов осаждаемого металла, обрабатывались ПАВ. Материалы с кобальтом, полученные без применения стабилизации не оказывают заметного подавления ЭМИ, как и никельсодержащие.

Для волокнистых материалов, содержащих кобальт, осажденный по сорбционной технологии, зависимость коэффициента передачи от частоты носит отличный от никельсодержащих материалов характер, не смотря на сходство физических и химических свойств осаждаемых материалов и электрических параметров синтезированных волокон (рис. 8.4). Абсолютная величина модуля коэффициента передачи не превышает величину -15 дБ во всем диапазоне частот, при этом наблюдается значительное уменьшение коэффициента отражения, однако говорить о том, что подавление ЭМИ обеспечивается только за счет поглощения энергии в объеме материала, можно лишь с определенной степенью достоверности, так как в этом случае увеличивается ошибка пересчета.

Наблюдаемое при повышении частоты изменение крутизны характеристики эффективности экранирования образца от частоты при незначительном изменении коэффициента отражения, обусловлено уменьшением толщины поверхностного слоя и, следовательно, повышением количества поглощаемой в материале энергии ЭМИ. При этом происходит и уменьшение волнового сопротивления материала, что обуславливает увеличение коэффициента отражения. Тем не менее коэффициент отражения исследуемого кобальтсодержащего образца весьма мал, по сравнению с образцами, содержащими никель и сплавы металлов (КСВН не превышает 2,5), что

делает перспективным использование дополнительных элементов конструкции из такого материала в качестве согласующего слоя в гибких радиопоглотителях.

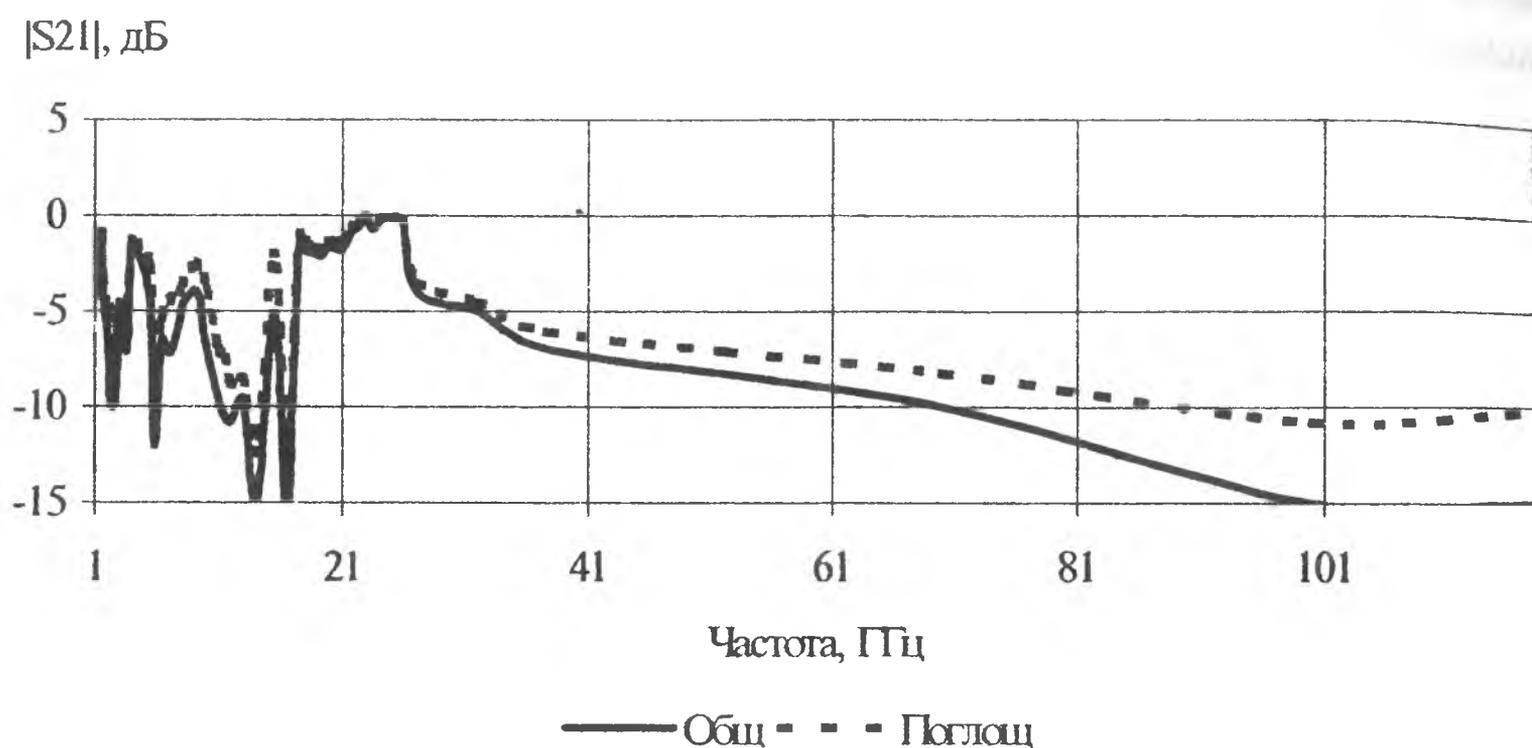


Рис. 8.4. Зависимость коэффициента передачи образца трикотажного полотна из кобальтсодержащего волокнистого материала

Обеспечение низкого коэффициента отражения достигается за счет уменьшения разности волновых сопротивлений среды распространения ЭМИ – воздуха и материала экрана. Этим требованиям соответствуют материалы, удельное электрическое сопротивление которых было не менее 10^{-2} Ом·м, так как дальнейшее уменьшение сопротивления приводит к увеличению коэффициента отражения. При этом материалы, удельное сопротивление которых выше 10 Ом·м, не подавляют ЭМИ за счет проводимости, и экраны из таких материалов малоэффективны.

Присутствие в волокнистом материале атомов никеля или кобальта обеспечивает дополнительно кроме диэлектрических и магнитные потери за счет образования полярных связей с молекулами полимеров.

8.2. Технология создания многослойных конструкций экранов электромагнитного излучения из трикотажных полотен

Одним из способов повышения характеристик экранов и радиопоглощающих покрытий является использование многослойных и градиентных структур.

Использование высокопроизводительного трикотажного оборудования позволяет формировать полотна с различной пространственной конфигурацией нитей. Объемные трикотажные конструкции могут формироваться непосредственно в процессе вязания, а также путем сопряжения слоев из отдельных трикотажных полотен.

8.2.1. Сшивание

Наиболее очевидным решением проблемы формирования многослойных объемных структур является сшивание отдельных полотен, каждое из которых обладает определенными свойствами.

В этом случае технология создания многослойных трикотажных РПП разделяется на несколько крупных этапов: формирование трикотажного полотна – основы для синтеза металлосодержащих волокнистых материалов, осаждение металлов из водных растворов на подложку и объединение различных полотен в объемную структуру прошиванием по всей площади покрытия.

Создание объемных структур путем сшивания позволяет обеспечить высокую воздухо- и гидропроницаемость полотен, их гибкость и создавать конструкции с пониженным весом.

Образцы трикотажных полотен из композитных материалов сопрягают таким образом, чтобы петельные ряды отдельных слоев располагались параллельно друг другу, после чего производится сшивание полотна по контуру с одновременным обрезанием краевых неровностей и обметыванием для предотвращения распускания и растрепывания полотен в процессе эксплуатации. Чтобы предотвратить взаимное смещение отдельных слоев производится прошивание полотен по площади с формированием фиксирующего рисунка, представляющего собой сетку с размерами элементарной ячейки не менее $1 \times 1 \text{ см}^2$, обеспечивающего фиксацию пространственного расположения структуры слоев относительно один другого. Увеличение размеров ячейки фиксирующего рисунка приводит к разделению слоев за счет различной растяжимости при эксплуатации в условиях различных аэро- или гидродинамических нагрузок.

В итоге, операцию сшивания материалов проводят по следующей схеме:

1. Глажение сопрягаемых полотен;
2. Вырезание отрезков необходимых размеров и формы;
3. Обметывание краев полотен;
4. Совмещение слоев;
5. Фиксация слоев по периметру;
6. Формирование фиксирующего рисунка по плоскости конструкции.

Глажение полотен осуществляется для устранения деформации полотна, возникшей в результате химической и влажностно-тепловой обработок, с помощью термо-механического оборудования. Температура глажения не должна превышать 110°C при времени обработки не более 1 мин для сохранения электрофизических свойств материалов.

Операции обметывания и фиксации слоев выполняются на стандартном швейном оборудовании с использованием машин типа "оверлок". После сшивания готовая конструкция поступает в эксплуатацию, либо на хранение, осуществляемое в рулоне или в виде отдельных пластин – отрезков прямоугольной формы.

8.2.2. Склеивание

Эксплуатация полотен в качестве экранов, связанная с механическим воздействием, приводит к растяжению многослойной конструкции. Избавиться от расслоения покрытия из-за разницы механических свойств материалов каждого слоя, можно фиксируя трикотажные полотна с помощью текстильного клея или порошковых легкоплавких полимеров. Такая технология позволяет работать с рулонами полотен и реализовать обработку конвейерного типа.

Поступающее после химической обработки полотно подвергается обрезке по краю для придания необходимой геометрической формы, и выравниваю по плоскости глажением. При распределении клеящего порошка необходимо осуществить закрепление нижнего слоя, представляющего собой отрезок уплотненного трикотажного полотна. На него с помощью дозаторов насыпается легкоплавкий клей СЭВ 11507-070 с температурой дублирования 120°C . Масса порошка составляет $0,5 \text{ г/см}^2$ поверхности полотна, что является достаточным для хорошей адгезии слоев между собой. После этого производится наложение следующего слоя и термообработка в течение 5 с при температуре 130°C под давлением 5 кг/см^2 . Затем аналогично производится наклеивание следующего слоя и т.д. (рис. 8.5).

Сформированная многослойная структура подвергается механической обработке для придания ей необходимого размера и формы. Отрезки полотна стыкуются между собой склеиванием по краю или сшиванием. Экспериментально показано, что при склеивании трикотажных полотен, на которые тонкие пленки никеля осаждали методом вакуумного распыления, происходит уменьшение эффективности экранирования на 5 дБ. Технология склеивания перспективна для соединения полотен, сформированных из композитных волокнистых материалов.



Рис. 8.5. Многослойная объемная трикотажная конструкция, полученная склеиванием отдельных полотен

8.2.3. Технология фиксации порошковых наполнителей между трикотажными полотнами

Одним из методов создания радиопоглощающих материалов является закрепление металлических частиц в высокомолекулярном связующем. При необходимости повышения эффективности покрытия перспективно использовать введение дополнительного слоя, содержащего металлический порошок между трикотажными полотнами.

Технология может быть реализована в двух вариантах: при послойном нанесении порошкового высокомолекулярного легкоплавкого связующего и металлического порошка и нанесении между полотнами смеси порошков полимера и металла. В качестве порошковых наполнителей использовали микродисперсный порошок никеля и железа (средний размер частиц не более 3 мкм), полученные механическим измельчением.

Отрезок трикотажного полотна-основы закрепляется на поверхности рабочего стола. На него с помощью дозатора производится нанесение слоя порошка легкоплавкого полимера (СЭВ 11808-340, температура плавления 100°C), слоя металлического порошка и еще одного слоя легкоплавкого порошка или нанесение смеси металлического и полимерного порошков (в массовом соотношении не более 1:2), которые затем закрываются вторым отрезком трикотажного полотна (рис. 8.6). Проводится термообработка полотен под давлением путем прокатывания между нагретыми до 110°C катками со скоростью 2 см/с.

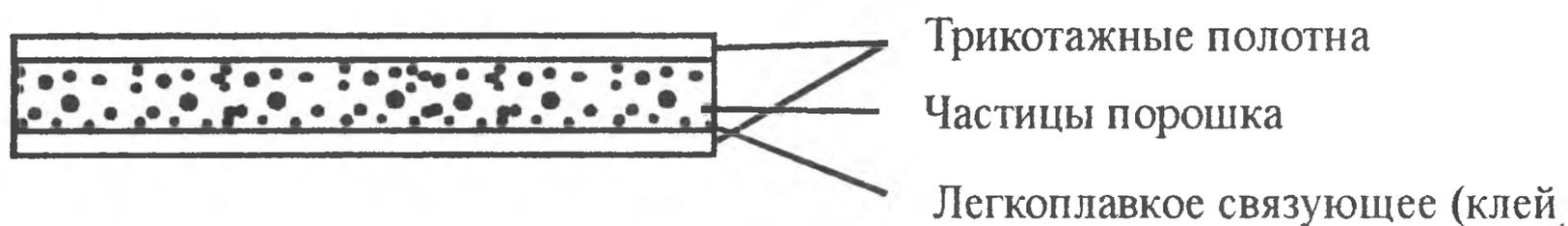


Рис. 8.6. Фиксация композитного материала на основе металлического порошка между трикотажными полотнами

Экспериментально установлено, что увеличение массовой доли металлической составляющей приводит к ухудшению адгезии между трикотажными слоями и разрушению конструкции.

8.3. Технология создания гибких экранов электромагнитного излучения и их применение

Проблема создания гибких эффективных экранирующих конструкций актуальна с учетом возрастающих требований к проектируемому и уже находящемуся в эксплуатации радиоэлектронному оборудованию с точки зрения экологии, электромагнитной совместимости РЭС и защиты информации. Трикотажное оборудование позволяет изготавливать полотна с различной конфигурацией нитей в полотне с высокой производительностью и в больших объемах.

Для создания высокоэффективных и широкополосных экранов из трикотажных полотен на вязальных машинах используются микропровод, металлические нити, композиционные волокнистые материалы, которые синтезируются на основе полимеров или могут быть получены на основе существующих волокон путем модификации их материала. Материал волокон может обрабатываться на различных этапах: изготовления трикотажа: в форме пряжи или

нитей; путем химической обработки полотен; после получения готового изделия по технологии кубового крашения.

Технология вязания трикотажных полотен на кругловязальных или основовязальных машинах с использованием микропровода или металлической нити имеет несколько особенностей, связанных с физико-механическими свойствами используемого сырья, отличными от свойств пряжи: упругостью, гибкостью, эластичностью и др.

8.3.1. Применение трикотажных полотен для создания гибких экранов

Экранирующее трикотажное полотно для стабилизации геометрических параметров ячеек должно по возможности иметь одинаковую во всех направлениях растяжимость, иметь хорошую воздухопроницаемость.

Таким требованиям может удовлетворять полотно с двухфактурных круглофанговых машин высокого класса. Наиболее перспективным направлением в создании трикотажных полотен с перечисленными выше требованиями является комбинирование известных переплетений и их элементов различными способами. При этом требуемые свойства полотна можно получить путем подбора переплетений, элементов петельной структуры, их чередования, оптимальных параметров петельной структуры и их соотношения. Комбинированные переплетения применяются с целью повышения формоустойчивости полотна.

Экранирующие трикотажные полотна создаются следующими основными способами:

1. Созданием проводящей структуры из микропровода;
2. Осаждением металла на поверхность полотен в вакууме;
3. Химического осаждения металлов из водных растворов.

Трикотажные экраны, содержащие микропровод, вяжутся на кулирных машинах переплетением гладь, производная гладь, интерлок, при изготовлении на основовязанных машинах может быть использовано переплетение трико. Использование основовязаного оборудования обосновано для специальных применений, так как при незначительном выигрыше в эффективности экрана, технология имеет сложности, связанные с необходимостью заправки микропровода в нитеводы, число которых определяется шириной полотна и, соответственно, количеством петельных столбиков. Присутствие нескольких десятков заправленных катушек с проволокой осложняет контроль и восстановление обрывов нитей по сравнению с кулирными машинами, использующими 1 или 2 катушки.

При изготовлении гибких сетчатых проволочных экранов на трикотажных машинах технология включает несколько обязательных этапов, связанных с приемкой и сортировкой поступившего сырья (рис. 8.7).

Сырье поступает партиями по товарно-транспортной накладной, в которой указывается поставщик, материал и линейная плотность пряжи, номер партии, количество, масса, цена. На каждую партию прилагается паспорт или сертификат с

физико-механическими параметрами пряжи. Микропровод характеризуется материалом провода, его диаметром, удельной проводимостью, массой и ценой.

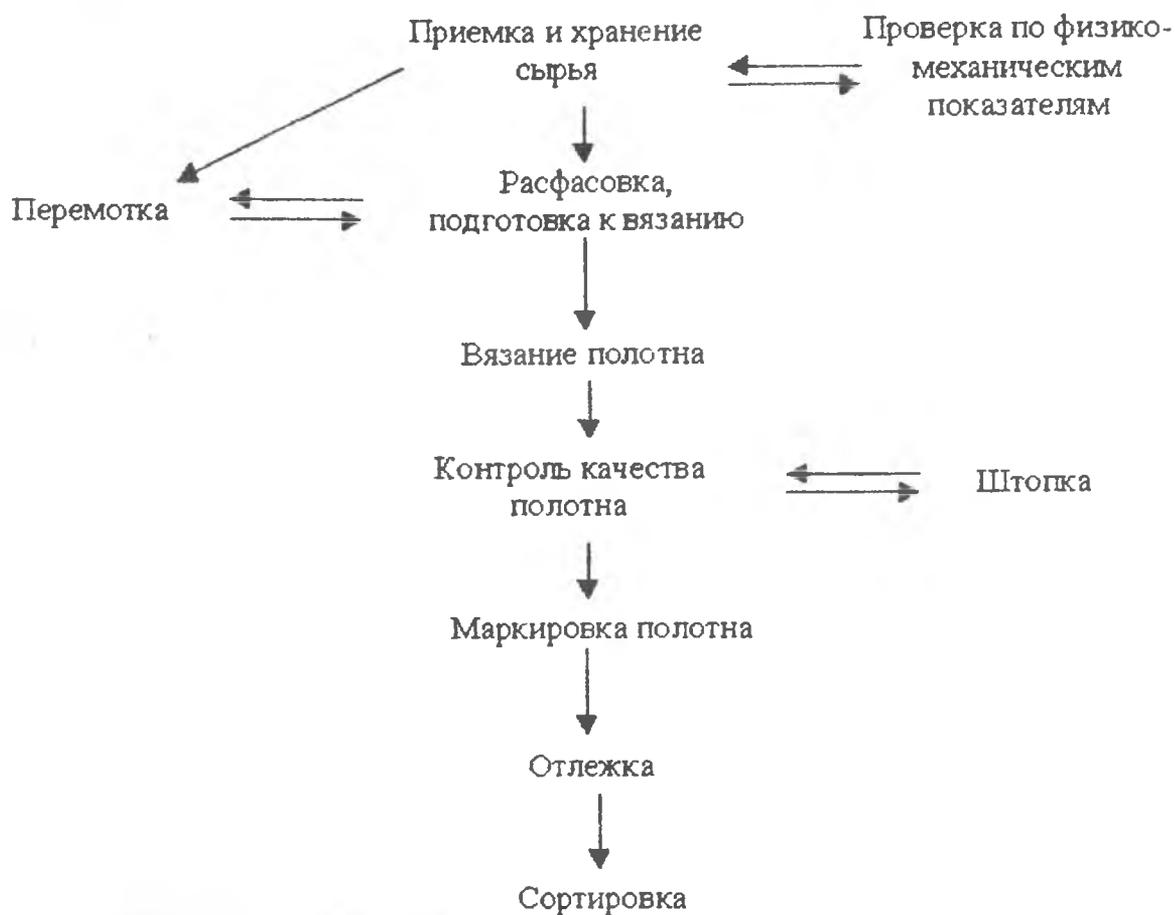


Рис. 8.7. Последовательность технологических операций формирования трикотажных полотен

Сырьем для изготовления гибких трикотажных экранов, обеспечивающих эффективность экранирования 20 дБ в диапазоне 0,1-300 МГц, является микропровод из нержавеющей стали диаметром 0,08 мм и синтетическая или хлопчатобумажная пряжа линейной плотности 15,4 текс в качестве ассистирующей нити.

При необходимости сырье подвергается перемотке на бобины на мотальных машинах МТ-150-2, оснащенных приспособлениями для парафирования, контрольными ножами, узловязателями.

При установке бобин на машину необходимо учитывать качество намотки, сравнить устанавливаемые бобины по виду и толщине пряжи. Вязание кругловязаного полотна производится согласно заправочной карте, соответствующей переплетению "производная гладь" (табл. 8.3). В процессе вязания осуществляется смена бобин, ликвидация обрыва нитей, замена игл, визуальный контроль качества и сьем полотна, чистка машины. При перезаправке машины на разные виды переплетений при изменении глубины кулирования особое внимание уделялось системной регулировке, которая для качественной отладки работы машины производилась с помощью прибора для определения скорости подачи нити.

Натяжение нитей определялось с помощью тензиометра и устанавливалось по возможности минимальным.

Таблица 8.3

Заправочная карта на вязание

| № | Параметр полотна | Значение |
|---|---|---|
| 1 | Вид переплетения | Производная гладь |
| 2 | Вид и линейная плотность сырья, | Стальной микропровод, диаметр 0,08 мм, хлопчатобумажная пряжа 15,4 текс |
| 3 | Длина нити в петле, мм | 3,3 |
| 4 | Число петель на 10 см вдоль ряда вдоль столбика | 120-5 97±2 |
| 5 | Поверхностная плотность, г/м ² | 150±5 |

Штопка полотна производилась с использованием микропровода или проводящей металлической нити для обеспечения электрического контакта между поврежденными частями.

После заключительной отделки перед дальнейшей обработкой полотно отлеживается в течение 24 часов в нормальных условиях.

Сортировку готового материала производят по следующим показателям:

- поверхностная плотность ρ г/м² [395],
- прочность на разрыв (разрывная нагрузка, Н),
- разрывное удлинение % [396],
- толщина трикотажа [397],
- эффективность экранирования ЭМИ.

Для использования в качестве гибких экранов готовые трикотажные полотна разрезают на необходимые отрезки, края которых обметываются проводящим материалом, чтобы обеспечить надежный электрический контакт экрана с корпусом прибора или контуром заземления для повышения эффективности экранирования.

Создание экранирующего полотна методом вакуумного магнетронного распыления после сортировки полотна (как с микропроводом, так и без него) производится закреплением рулона на приемо-подающих валах вакуумной установки ВУ-2Мп. Осаждения слоя никеля, толщиной 0,1 мкм. В качестве сырья для формирования трикотажного полотна – подложки для осаждения – применяются высокообъемные синтетические волокнистые материалы (ПАН), однако могут быть использованы и другие виды волокон из натуральных и синтетических материалов.

После окончания процесса вязания и разбраковки аналогично предыдущему случаю производится обметывание краев полотен, однако при использовании синтетических волокон для изготовления трикотажной подложки можно применить термообработку внешних краев отрезка при температуре, превышающей

температуру плавления полимера на 5-10⁰С (230⁰С для ПАН) в течении 1 с для расплавления концов волокон и спекания их в кант.

Формирование экранирующих трикотажных полотен из композитных волокнистых материалов для СВЧ диапазона связано с дополнительной химической обработкой материала волокон после формирования полотна, которая осуществляется при режимах и на оборудовании, аналогичном используемому для крашения трикотажа. В случае использования полиакрилонитрильных волокон последовательность технологических операций выглядит следующим образом:

1. Изготовление полотна (см. рис. 8.7),
2. Удаление с поверхности волокон остатков парафина и внешних загрязнений, возникших в процессе вязания (обработка в мыльном растворе при температуре 80⁰С в течение 30 мин, промывание водопроводной горячей, а затем холодной водой),
3. Модифицирование ПАН (обработка при постоянном перемешивании в растворе гидроксиламина (концентрация 300 г/л) при температуре 75⁰С в течение 45 мин, затем повышение рН до 8 с помощью Na₂CO₃ и продолжение процесса при постоянной температуре до приобретения волокнами матового розоватого оттенка),
4. Отмывание полотна от остатков компонент раствора в холодной и горячей воде,
5. Осаждение никеля из водных растворов в течение 60 мин (по палладиевой или сорбционной методике),
6. Отмывание от остатков электролита – обработка в обескислороженной дистиллированной воде,
7. Создание защитного слоя для стабилизации электрофизических параметров путем обработки ПАВ (трансформаторным, силиконовым маслом),
8. Формирование отрезков полотен необходимой формы разрезанием исходного полотна на части,
9. Обметывание краев полотен.

При изготовлении полотен необходимо учитывать усадку материала и выбирать переплетения, обеспечивающие пониженное гидросопротивление трикотажа – комбинированного типа.

Степень модифицирования и, соответственно, сорбционная емкость ПАН зависит от температурно-временных параметров процесса: увеличение температуры и времени обработки приводит к повышению скорости химических реакций и увеличению степени модифицирования, однако если температура превышает 75⁰С, разрушается структура волокон, что приводит к ухудшению механических свойств материалов и потере гибкости.

Предложенная технология позволяет сохранить основные преимущества трикотажного способа формирования гибких конструкций с возможностями создания проводящих и экранирующих материалов и применить эластичные экраны

в конструкциях защитной специальной одежды, сигнальных и защитных экранов радиоэлектронного оборудования.

8.3.2. Трикотажная экранирующая одежда

Экранирующий трикотаж с микропроводом наряду с экранирующими текстильными материалами может получить широкое распространение для создания спецодежды для защиты персонала от ЭМИ радиочастотного диапазона. Технология изготовления экранирующих халатов, накидок, перчаток и других элементов верхней одежды на трикотажном оборудовании отличается возможностью формирования отдельных элементов трубчатой формы бесшовным способом. Дальнейший порядок операций аналогичен обычным процессам изготовления одежды с той особенностью, что при сшивании элементов необходимо использовать металлические проводящие нити.

Трикотажные полотна из композитных волокнистых материалов используются только для изготовления верхней одежды. Если изделие непосредственно контактирует с кожей человека, то необходимо предусмотреть дополнительный подкладочный слой из гигроскопичного материала, например, хлопчатобумажного полотна.

При работе в зоне с повышенной напряженностью электромагнитного поля в частотном диапазоне до 1 ГГц обязательно обеспечивается заземление одежды. Для работы в СВЧ диапазоне необходимо использовать более эффективные и широкополосные экранирующие полотна из композитных никельсодержащих волокнистых материалов. Для них также обеспечивается изоляция от контакта с кожей человека путем введения прокладочного слоя.

Таким образом, последовательность технологических операций изготовления верхней одежды для защиты от электромагнитных излучений радиочастотного диапазона (30-1000 МГц) включает в себя кроме изготовления трикотажного экранирующего полотна с микропроводом операции по раскраиванию, обметыванию, сшиванию элементов халатов, изготовлению подкладочного материала, металлизацию кромок одежды для обеспечения заземления. Защитные перчатки и рукавицы с микропроводом изготавливаются на специальном трикотажном оборудовании. Для защиты биологических объектов в СВЧ диапазоне (18-118 ГГц) перспективно использовать никельсодержащие полотна, полученные методами вакуумной металлизации или химического осаждения, однако в этом случае также обязательно наличие гигроскопичного подкладочного слоя, контактирующего с кожей.

8.3.3. Возможные применения эластичных трикотажных экранов в конструкциях РЭС

Для уменьшения побочных излучений блоков радиоэлектронного оборудования с целью обеспечения требований ЭМС и защиты безопасности

температуру плавления полимеров
расплавления концов волокон

Формирование

волокнистых материалов

обработке

осуше

нить

и применение

везде

и

Обычно узлы помещаются в

конструктивные функции, так и

всегда возникают сложности с

аппаратуры, требующих наличия

лемы с обеспечением коммутации блоков

местами являются места ввода-вывода

и, вентиляционные отверстия, экранирования

осуществить невозможно, корпусные стыковые

РЭС наиболее перспективными являются

конструкции экранов. Этим требованиям в полной

железные металлические сетки и экранирующие полотна.

Они используются в качестве уплотнителей, экранов отдельных элементов и

узлов, частей печатных плат, линий связи и всей системы в целом [398,

399].

При использовании сигнального и защитного экранирования к

конструкциям предъявляются требования максимальной эффективности

экранирования и обеспечения необходимых конструктивных особенностей. Для

экранирования электростатической составляющей ЭМП экран должен обладать

минимальным электрическим сопротивлением и иметь электрический контакт с

"землей" или корпусом блока (рис. 8.8). Он обеспечивает электростатическую

изоляция пространства, в котором размещается конструктивный элемент

устройства, от внешней среды, т.е. обеспечивает подавление как полей,

воздействующих на элемент, так и ЭМИ, излучаемые самим элементом.



Рис. 8.8. Применение металлосодержащего трикотажного полотна в качестве электростатического экрана

Наиболее очевидным является применение трикотажных конструкций для защитного экранирования, связанного с уменьшением внешних полей внутри экранируемой области [400]. При этом трикотажные экраны могут выступать как отдельные элементы конструкции, так и в качестве эргономического покрытия к металлическим экранам, повышающего помехозащищенность устройства.

Использование трикотажных экранов для защитного экранирования применимо для защиты узлов, блоков, радиотехнических систем и повышения помехозащищенности линий связи между ними (рис. 8.9). При этом

металлизированное полотно, закрывающее вентиляционное отверстие блока или линию связи, контактирует с металлическим корпусом по всему периметру отверстия.



Рис. 8.9. Применение трикотажного полотна в качестве защитного электромагнитного экрана

В случае экранирования проводных линий путем заключения проводников в гибкий трикотажный чехол, обеспечивается заземление экрана через каждые 1,5-2 м. Использование машинно-взаного полотна с микропроводом в конструкциях спецпомещений, оно выполняет роль верхнего декоративного слоя и одновременно повышает эффективность экранирования конструкции стенок на 10-15 дБ во всем диапазоне частот до 1 ГГц (рис. 8.10). Боковая стена передвижной экранированной комнаты выполнена из сварных металлических листов, имеющих ребра жесткости. Внутренний слой изготавливается из негорючего металлизированного углеволокна, что повышает эффективность экранирования до 70 дБ, однако остается проблема обеспечения требуемых характеристик в местах стыков листов и углах помещения. Для повышения эффективности, а также внутренней отделки комнаты использовано трикотажное полотно с микропроводом из нержавеющей стали диаметром 0,08 мм, сформированное комбинированным переплетением производная гладь.

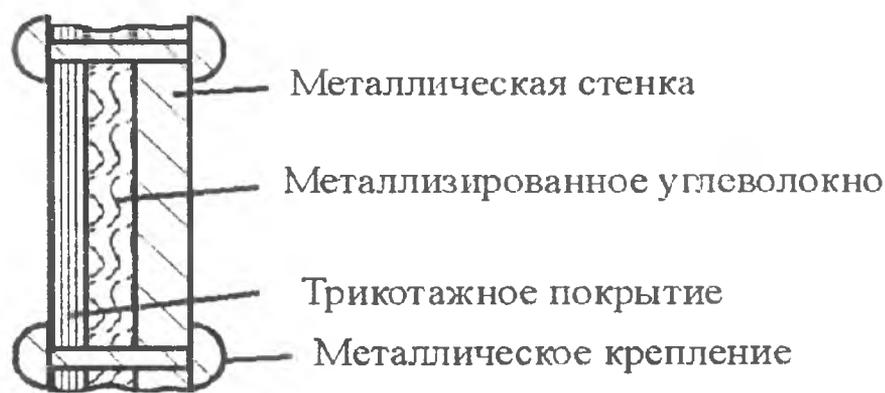


Рис. 8.10. Применение трикотажного полотна для повышения помехоустойчивости изделий специального назначения

Крепление полотна с одновременным заземлением осуществляется металлическими заклепками по линиям ребер жесткости.

8.4. Технология формирования многослойных конструкций экранов электромагнитного излучения

8.4.1. Свойства многослойных конструкций экранов электромагнитного излучения на основе машинно-вязаных полотен

Экранирующие свойства никель и кобальт содержащих материалов позволили исследовать и разработать конструкции, способные выступать не только в роли экранов, но также и поглощать ЭМИ. На основе литературного обзора было отмечено, что перспективной конструкцией радиопоглощающего покрытия является многослойная структура с градиентом электрических и магнитных свойств по толщине.

Исследовались многослойные трикотажные конструкции, сформированные сшиванием отдельных слоев в виде полотен из материала, содержащего никель или кобальт, осажденный на полиакрилонитрильную или целлюлозную основу разработанным методикам. Конструкция представляла собой два сопряженных полотна из модифицированного полиакрилонитрила, на который осаждался никель и кобальт. Полотна размещались по отношению к источнику излучения в следующем порядке: Co-Ni и Ni-Co. При исследовании влияния конструкции экрана на его характеристики (рис. 8.11) показано, что трикотажное полотно из кобальтсодержащего волокнистого материала выполняет роль согласующего слоя [401].

Обе конструкции имеют сходные характеристики коэффициента передачи, но сильно различны для коэффициента отражения, что обуславливает больший уровень поглощаемого сигнала в случае использования конструкции Co-Ni. Полученный вид характеристик связан с особенностями характеристик слоев: при падении ЭМИ на границу раздела сред в случае, если в качестве первого слоя выступает полотно из никельсодержащего материала, имеющее высокий коэффициент отражения, происходит значительное отражение электромагнитной энергии от первого слоя. Когда в качестве первого слоя выступает кобальтсодержащий материал с низким коэффициентом отражения, то энергия ЭМИ проникает в глубь экрана. Отражение от границы раздела Co-Ni меньше, чем от границы воздух-Ni, а отраженное излучение дополнительно поглощается слоем кобальтсодержащего трикотажа. Таким образом отмечено, что использование многослойной градиентной конструкции позволяет улучшить характеристики экранов. В нашем случае образовывали градиент по электропроводности и отражающим характеристикам материала полотна. Различие в макроскопических свойствах обусловлено дисперсностью синтезированного осадка, использованным способом стабилизации, материалом подложки.

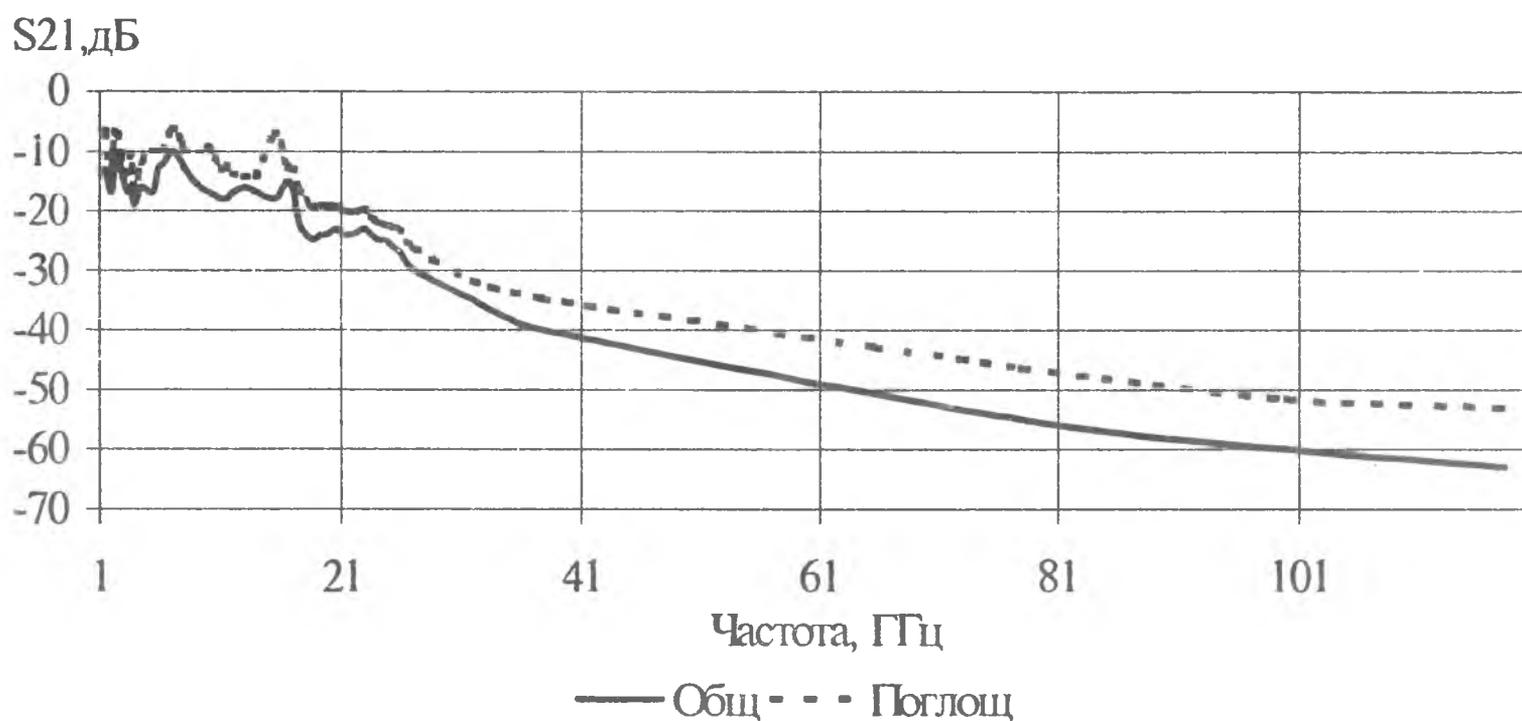
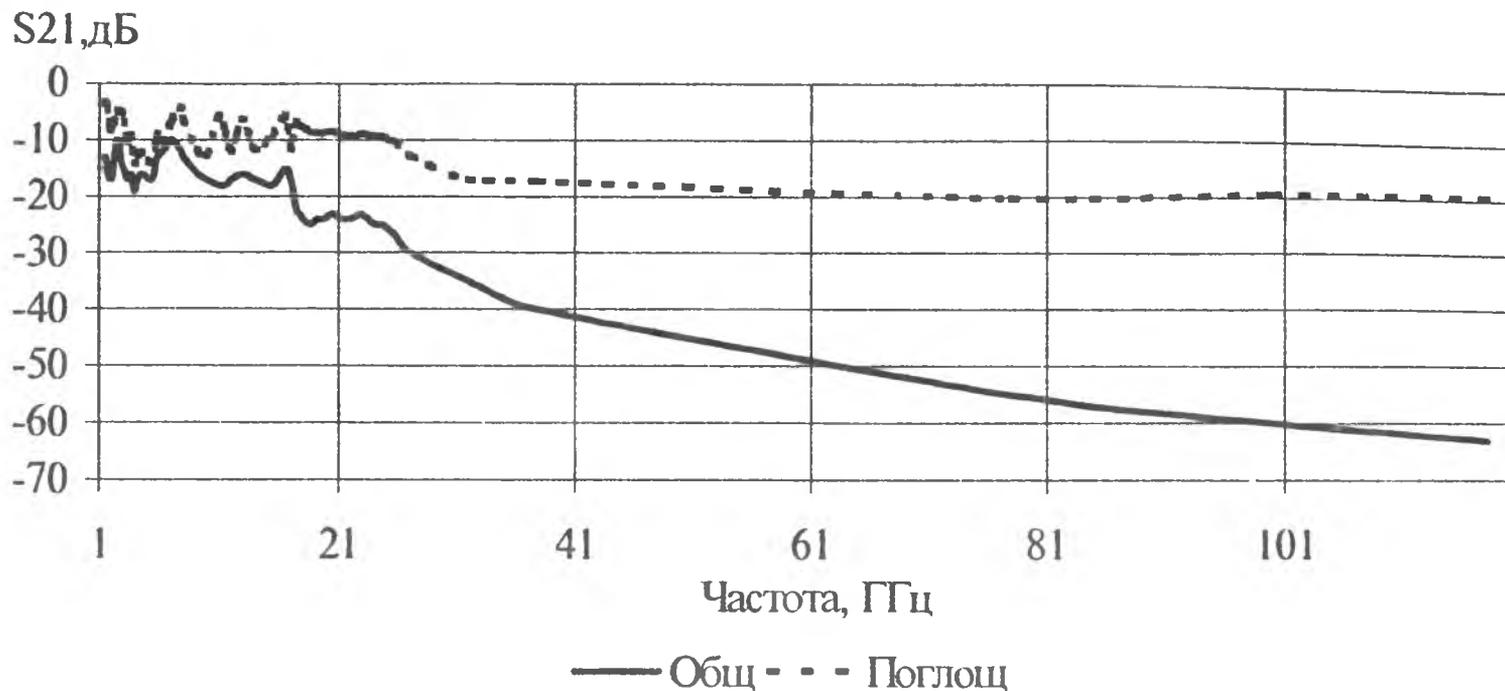


Рис. 8.11. Характеристики экранов в зависимости от их конструкции: а) – конструкция Ni-Co, б) – конструкция Co-Ni

Радиопоглощающее покрытие должно обладать минимальным коэффициентом отражения при максимальном подавлении ЭМИ, минимальной толщине и массе. Оптимальной конструкцией является многослойная конструкция, каждый последующий слой которой имеет больший коэффициент отражения и более высокую эффективность экранирования. Сравнивая свойства машинно-вязаных полотен в СВЧ диапазоне частот, разработана трехслойная конструкция радиопоглощающего покрытия, где в качестве первого, согласующего слоя выступает трикотажное полотно из композитного кобальтсодержащего материала, обладающее наиболее низким коэффициентом отражения и лучше согласованного со средой распространения ЭМИ. Вторым, рабочим слоем, является полотно из никельсодержащего материала, полученного осаждением никеля на модифицированный ПАН сорбционным способом. Этот слой имеет более высокую электропроводность и эффективнее подавляет излучение. Чтобы повысить

эффективность конструкции, используется третий, отражающий слой, который возвращает прошедшее через экран излучение опять в толщу покрытия. При этом отраженная от последнего слоя энергия дополнительно поглощается в рабочем и согласующем слое. В качестве последнего слоя необходимо применять полотно с наибольшим коэффициентом отражения. Такими характеристиками обладают металлизированные материалы, полученные осаждением никеля в вакууме или из водного раствора по палладиевой методике.

Исследование различных конструкций радиопоглощающих покрытий позволило получить покрытие следующего типа: согласующий слой – кобальтсодержащий ПАН, сопротивление которого 150 Ом·м, коэффициент отражения не хуже –10 дБ в диапазоне частот 18-118 ГГц и не хуже – 4 дБ в диапазоне 1,5-18 ГГц; рабочий слой – никельсодержащий ПАН с сопротивлением 2 Ом·м и коэффициентом прямой передачи не более –20 дБ; в качестве третьего слоя использовано трикотажное полотно с пленкой никеля, толщиной 0,1 мкм, полученной распылением металла в вакууме, как наиболее простым и недорогим методом.

Сопряжение слоев производится путем сшивания их между собой, что позволяет облегчить конструкцию и сохранить ее воздухопроницаемость и гибкость, которая обуславливается гибкостью каждого из слоев.

Характеристики конструкции, приведенные на рис. 8.12, имеют неравномерность в диапазоне частот 1,5-18 ГГц, где ее толщина меньше теоретически оценки для уровня –10 дБ, поэтому поглощение излучения носит преимущественно резонансный характер.

При увеличении частоты толщина поверхностного слоя становится сравнима с толщиной отдельного слоя и характеристика выравнивается. Наблюдается повышение уровня поглощаемого излучения при увеличении частоты излучения, однако угол наклона характеристики уменьшается, что связано с усилением влияния процесса распространения волны в поверхностном слое на поглощение ЭМИ, когда общая толщина конструкции не сказывается на эффективности экранирования, а подавление излучения происходит в рабочем и согласующем слоях.

8.4.2. Имитационные гибкие материалы

Во многих конструкциях РЭС необходимо создавать имитацию земной поверхности, объектов, генераторов, что делает актуальной разработку гибкого облегченного многофункционального имитирующего укрывного материала.

Для имитации земной поверхности покрытие должно иметь отражающие характеристики аналогичные характеристиками земной поверхности (коэффициент отражения не более 0,5) в радиочастотном диапазоне, а также быть окрашено в соответствии с ландшафтом. Чтобы обеспечить требования незаметности объектов в видимом, инфракрасном, ультрафиолетовом и радиочастотном диапазонах длин

волн, добавляется радиопрозрачный вспомогательный первый слой, создающий имитацию земли в видимом и ультрафиолетовом диапазоне путем нанесения соответствующей краски на полотно. Отражающие характеристики в радиочастотном диапазоне обеспечиваются подбором согласующего слоя таким образом, чтобы его характеристики были максимально приближены к свойствам земной поверхности, что достигается путем изменения количества осажденного металла, что влияет на величину волнового сопротивления покрытия и отражение ЭМИ от него. Введение рабочего слоя обеспечивает подавление излучения, которое отражается от накрываемых объектов, а также собственного их собственного излучения. Кроме того, вся трикотажная конструкция в силу пористости и теплозащитных свойств материалов, сформированных из высокообъемных волокон, обеспечивает теплоизоляцию объектов от внешней среды и усложняет их обнаружение в инфракрасном диапазоне.

При необходимости имитации излучателей или работающих радиоэлектронных устройств в конструкцию имитирующего покрытия вводится слой трикотажа с микропроводом, подсоединенного к имитирующему генератору. В силу гибкости покрытия ему может быть придана сложная форма реальных объектов путем закрепления его на проволочном каркасе.

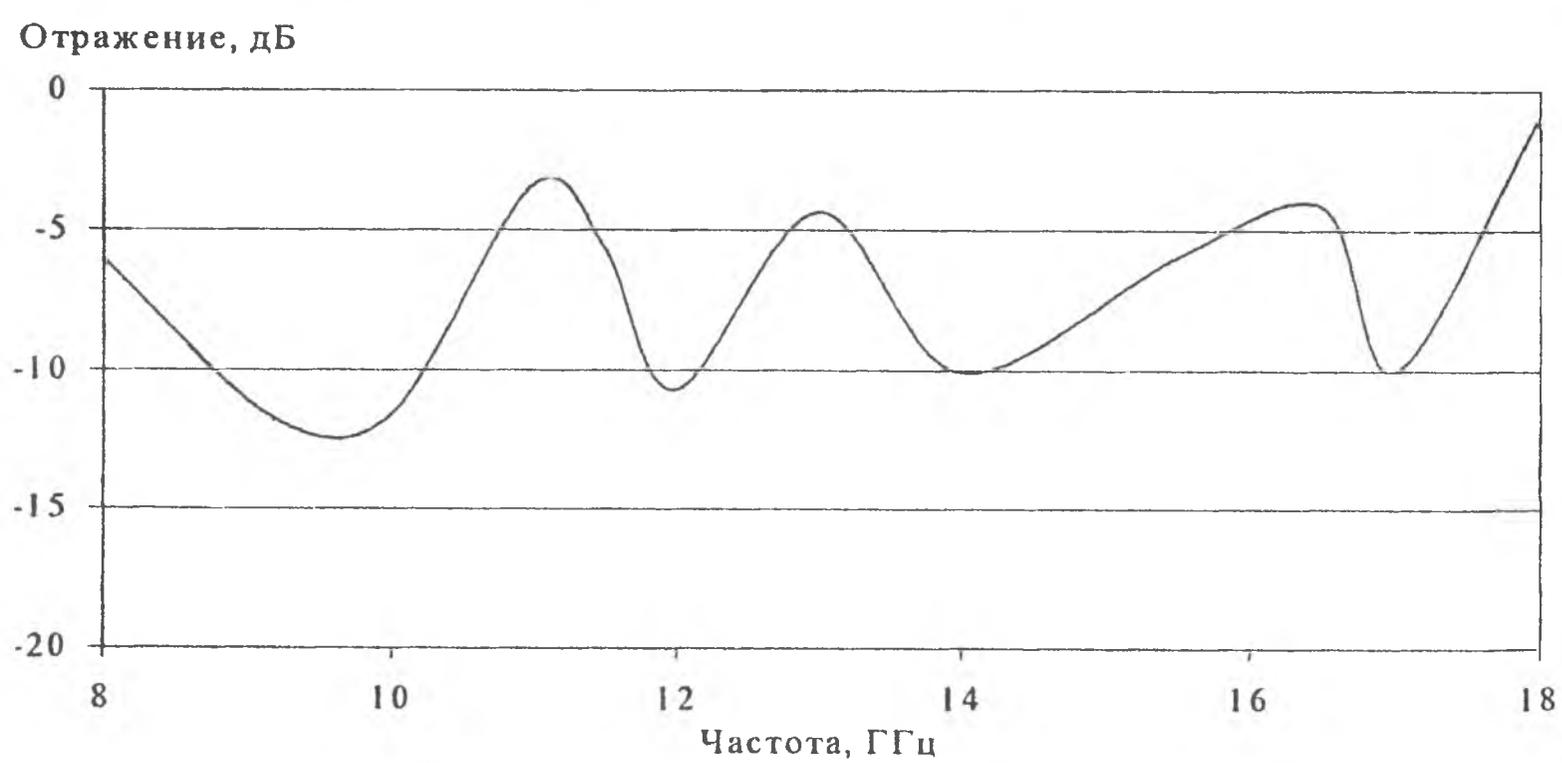
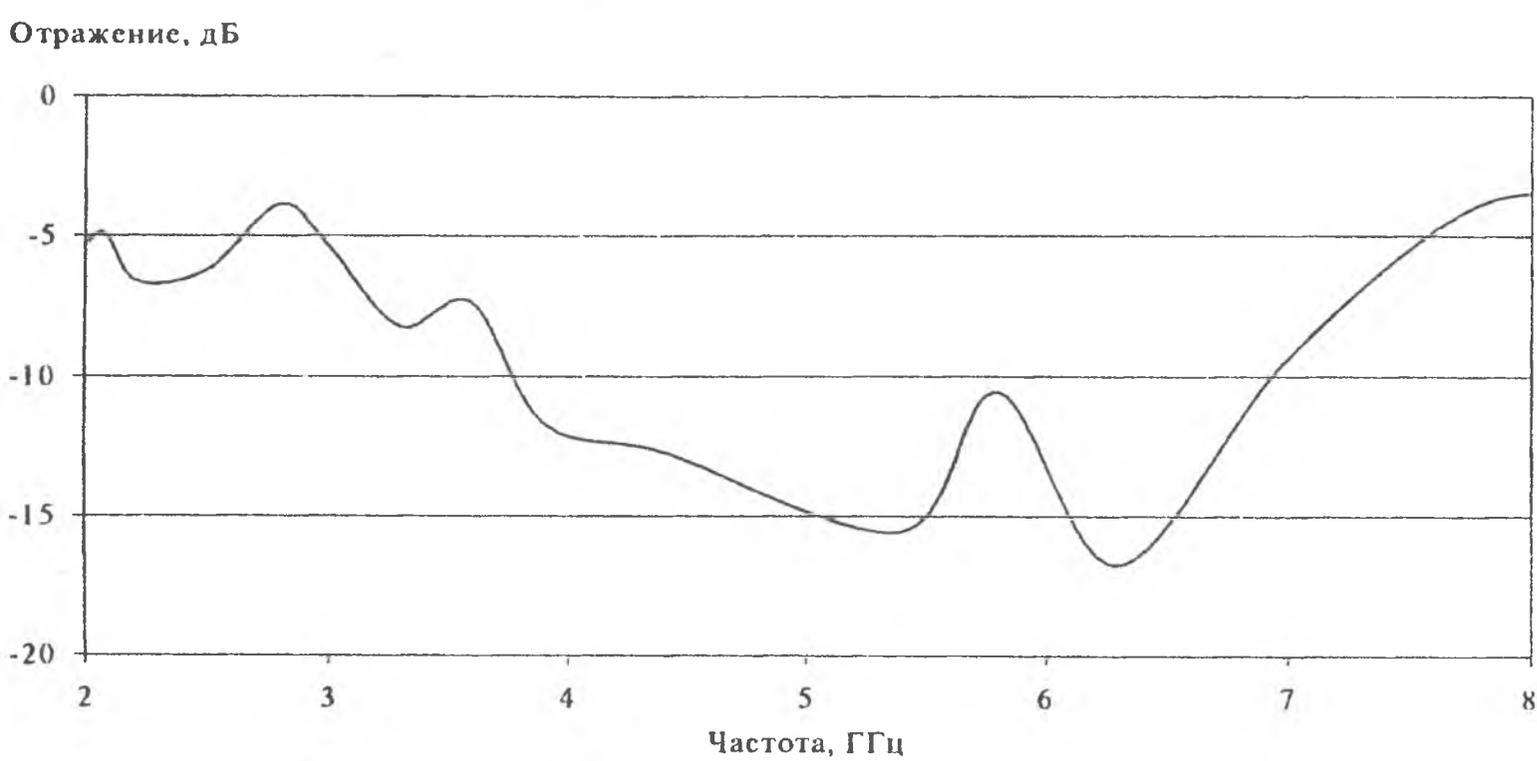
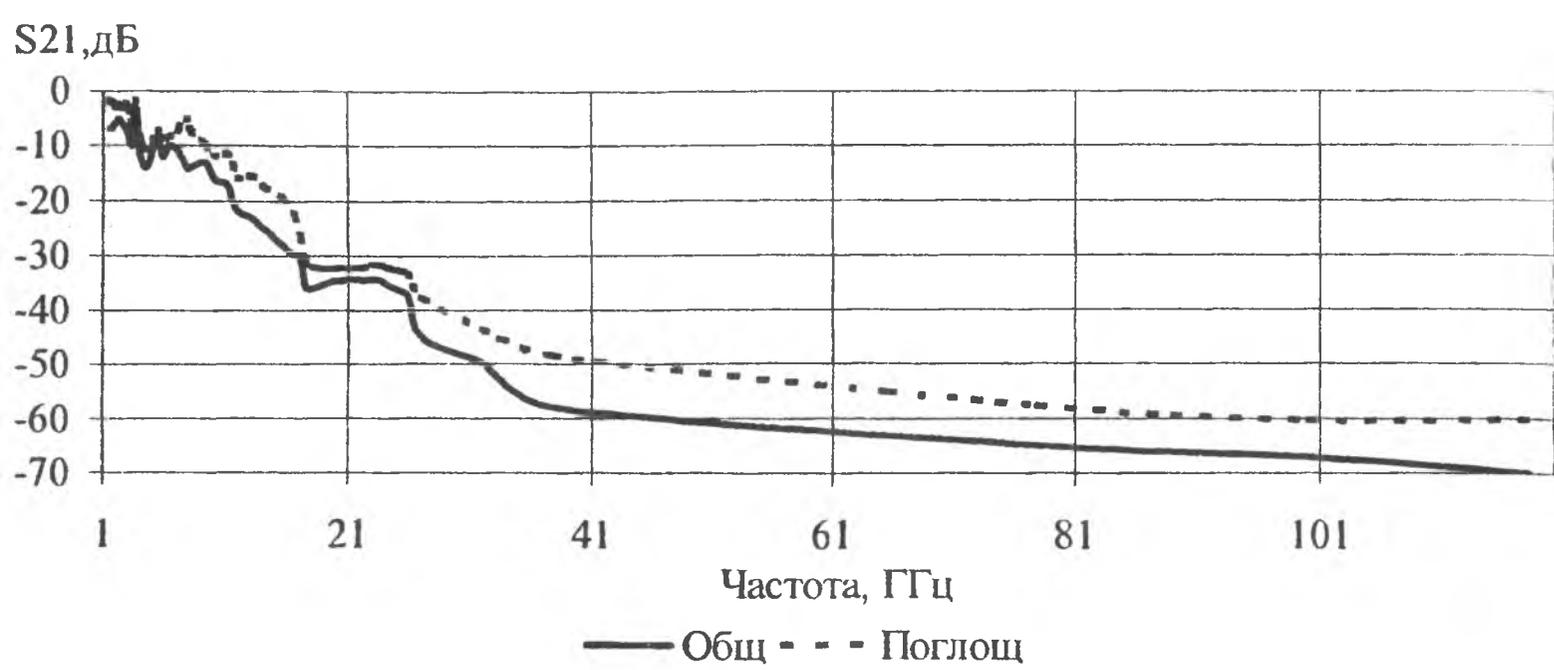


Рис. 8.12. Характеристики гибкого экрана

9.1. Экранирование отдельных узлов РЭА и их соединений

9.1.1. Экранирование трансформаторов

В трансформаторах питания, низкочастотных (звуковых, кадровых) трансформаторах и дросселях питания основной рабочий магнитный поток проходит по магнитопроводу. Внешний магнитный поток рассеяния, составляющий небольшую часть основного потока, выходит за пределы трансформатора или дросселя, замыкаясь по воздуху. Магнитный поток рассеяния индуцирует напряжение помех в катушках индуктивности, а также замкнутых контурах цепей, расположенных в ортогональной плоскости. Например, помехи от трансформатора питания могут воздействовать на низкочастотные трансформаторы в усилителях с высокой чувствительностью. Потенциально источниками наиболее интенсивных помехонесущих магнитных полей являются дроссели фильтров питания при наличии воздушных зазоров в сердечниках, вводимых для предотвращения насыщения. Особенно восприимчивы к магнитному полю рассеяния электронно-лучевые трубки. Влияние поля может проявляться в геометрических искажениях телевизионного изображения, появлении яркостного фона, нарушении фокусировки и т.д. В порядке возрастания полей рассеяния в зависимости от используемого магнитопровода трансформаторы располагаются в такой последовательности: тороидальные, стержневые, броневые. Интенсивность полей рассеяния у всех типов трансформаторов растет с увеличением мощности, с уменьшением сечения магнитопроводов и высоты катушек, а также с ухудшением магнитных свойств магнитопроводов. В этой связи для снижения интенсивности поля рассеяния трансформатора питания следует применять высококачественные магнитные материалы для магнитопровода, а также уменьшать в нем воздушные зазоры. С этой же целью в тороидальных трансформаторах обмотки следует распределять по всей длине сердечника равномерно независимо от числа витков.

При совместной компоновке трансформаторов их следует располагать на возможно большем расстоянии с ориентировкой магнитных полей под углом 90° . Эффективное снижение магнитных полей рассеяния трансформаторов и дросселей достигается экранированием. Например, в конструкции дросселя фильтра с воздушным зазором используют многослойный экран, состоящий из короткозамкнутого алюминиевого или сварного медного витка и внешнего экрана из магнитного материала.

В трансформаторах питания и низкочастотных трансформаторах для устранения емкостной связи между первичной и вторичной обмотками устанавливается разомкнутый виток из медной фольги с перекрытием, прокладываемой между обмотками по всей длине катушки трансформатора. Виток

соединяется с корпусом аппаратуры и выполняет роль электростатического экрана. Применением заземленной с одного конца однослойной экранирующей обмотки, второй конец которой изолирован, неэффективно из-за индуктивного характера рассматриваемого экрана и его большей электрической проницаемости по сравнению со сплошным витком. Эффективным средством подавления помех в современных импульсных источниках питания является применение двух электростатических экранов в разделительном трансформаторе, которые присоединяются соответственно к двум различным кондуктивно (гальванически) развязанным опорным точкам.

9.1.2. Экраны высокочастотных катушек и контуров

При экранировании высокочастотных катушек индуктивности или контуров аппаратуры следует учитывать возможность ухудшения их основных электрических параметров: уменьшение индуктивности, увеличение сопротивления и собственной емкости. Вносимые экраном потери возрастают с уменьшением проводимости материала и расстояния между экраном и катушкой. Поскольку эквивалентное затухание контура определяется затуханием катушки и должно быть достаточно малым, то в качестве материала экрана следует применять немагнитные металлы (медь, латунь, алюминий), а размеры экрана, исходя из конструктивных соображений, выбирать по возможности большими.

На практике экраны высокочастотных катушек и контуров выполняют цилиндрической и прямоугольной формы, выбирая зазор между экраном и катушкой не менее половины диаметра катушки. При конструировании экранов следует располагать стыки, швы, щели в направлении вихревых токов, определяющих экранирующий эффект. Экранирование электрического поля при этом легко обеспечивается в случае надежного электрического контакта с корпусом аппаратуры. Следует учитывать, что применение заземленного экрана приводит к увеличению собственной емкости катушки за счет добавления к ней емкости экрана.

9.1.3. Защита транзисторов и интегральных схем

Общий вывод транзисторов и интегральных схем (ИС) в металлическом или металлостеклянном корпусе должен соединяться с общим корпусом аппаратуры. При этом корпус выполняет роль экрана и одновременно служит теплоотводом для активных элементов, предназначенных для работы в выходных каскадах и узлах питания аппаратуры. В случае, если пластмассовое или керамическое основание прикрывается одной или двумя металлическими крышками, не имеющими соединения с общей точкой внутренних частей ИС, а также вывода для подключения к печатной плате, это может привести к увеличению емкостной связи внутри микросхемы и между соседними микросхемами. При размещении тонкопленочной или полупроводниковой ИС на одной стороне подложки электропроводная пленка, нанесенная на другую сторону, может выполнять роль экрана и присоединяться к

выводу ИС для дальнейшего подключения к корпусу устройства. Таким способом могут экранироваться друг от друга рядом расположенные ИС, которые оказываются также защищенными от воздействия внешних помехонесущих электромагнитных полей.

Транзисторы и ИС в пластмассовых корпусах при необходимости могут быть экранированы внешними металлическими колпачками или перегородками, соединенными с общим корпусом РЭА. Другой метод экранирования заключается в нанесении на пластмассовый или керамический корпус транзистора или ИС проводящего покрытия с последующим его заземлением.

9.1.4. Соединение отдельных блоков

Соединительные линии применяются для передачи сигналов к отдельным функциональным узлам, блокам, радиотехническим устройствам. Для аппаратуры, работающей в диапазонах длинных, коротких и иногда метровых волн, в основном используется проводной и печатный монтаж. В диапазонах метровых и дециметровых волн наибольшее применение получили радиочастотные коаксиальные кабели, обладающие высокой помехозащищенностью и обеспечивающие малые потери в широком диапазоне частот.

При применении экранированных проводов одноточечное присоединение оплетки к корпусу аппаратуры, исключая влияние электрического поля помех, не защищает от магнитного поля. Для подавления магнитного поля помех весь обратный ток экранируемой цепи следует направить через экранирующую оплетку провода. На практике экранирующие оплетки монтажных проводов длиной свыше 100 мм заземляют с обоих концов. При этом следует учитывать возможность ухудшения магнитного экранирования из-за появления дополнительной ветви обратного тока, нарушающей компенсацию магнитных полей прямого и обратного токов. В этом случае также появляется петля-контур, образованный экранирующей оплеткой и землей, на который может воздействовать внешнее магнитное помехонесущее поле, а также кондуктивные (гальванические) помехи, определяемые конечным сопротивлением корпуса или шасси аппаратуры. На высоких частотах из-за наличия взаимной индуктивности между экраном и центральным проводником экран создает цепь возврата тока с более низкой индуктивностью, чем цепь заземления, в результате чего эффективность экранирования повышается.

Высокая эффективность ослабления помех обеспечивается при использовании двойных экранов, а также витой пары, защищенной экранирующей оболочкой. Недостатком применения экранирующей оболочки является увеличение паразитной емкости соединения. Длина экрана должна быть значительно меньше четверти длины самой короткой волны передаваемого сигнала. Если указанное условие не выполняется, то экранированный провод следует рассматривать как длинную линию, которая должна быть на концах нагружена на согласованное сопротивление.

С целью уменьшения возможных нежелательных электромагнитных связей между проводами монтажа следует связывать в жгут и экранировать провода с токами низких частот, например провода сети питания, цепей управления и т.д. Для уменьшения взаимного влияния высокочастотных цепей рекомендуется выбирать длину соединительных проводов наименьшей, для чего элементы высокочастотных схем, связанные между собой, необходимо располагать в непосредственной близости, а пересечение проводов выполнять под прямым углом. При параллельном расположении такие провода должны быть максимально удалены друг от друга или разделены экранами.

9.1.5. Экранирование проводов и кабелей

Оплетка проводов, не соединенная с корпусом, никакого экранирующего действия не вызывает. При соединении с корпусом в одной точке в окружающее пространство не будет проникать только электрическое поле. По цепи внутренний провод – оплетка – корпус протекает емкостный ток, растущий с повышением частоты. Эффективность зависит от качества контакта между оплеткой и корпусом.

Для экранирования магнитного поля необходимо, чтобы весь обратный ток генератора протекал по оплетке. Тогда оба тока будут создавать магнитные потоки, равные по величине и обратные по направлению, которые взаимно компенсируются. Полная компенсация получается только тогда, когда оплетка является единственным соединением корпусов отсека генератора с отсеком нагрузки. На низких частотах глубина проникновения ЭМП в тело корпуса и оплетки велика, и при дополнительном замыкании их часть обратного тока будет протекать минуя оплетку, что нарушит экранирование. Чем выше частота, тем меньше вероятность снижения эффективности при замыкании корпусов и оплетки.

Применение экранированных проводов для внутриприборного монтажа всегда нежелательно, так как они увеличивают емкость провода на корпус, громоздки, усложняют монтаж и требуют предохранения от случайных соединений с другими деталями. Поэтому прежде, чем прибегнуть к экранированным проводам, следует рассматривать все другие варианты предохранения от наводок. При этом почти всегда найдется удобный вариант, позволяющий обойтись без экранированных проводов.

Экранированные провода, коаксиальные кабели и многожильные экранированные шланги с экранированными проводами внутри них следует применять в основном для соединения отдельных блоков и узлов друг с другом. Они позволяют защитить многоблочные устройства от наводок, поступающих извне, от взаимных наводок внутри устройства и защитить от наводок приборы, находящиеся в окружающем пространстве. Следует обратить особое внимание на качество присоединения оплеток к корпусам приборов [402].

9.2. Использование радиопоглощающих материалов и покрытий в системах вооружения

9.2.1. Электромагнитная маскировка наземных объектов

Приоритетным направлением является электромагнитная маскировка наземных объектов. Важнейшая проблема - создание материалов, способных снизить дальность обнаружения подвижных и неподвижных радиолокационных целей. Эта задача может решаться путем использования экранов ЭМИ [403, 404].

В ОАО НИИ Стали (Россия) создано устройство "Накидка" для маскировки наземной техники (рис. 9.1). Она состоит из специального синтетического теплоизоляционного материала, температура внешней поверхности которого соответствует температуре окружающего воздуха. Применение "Накидки" позволяет снизить в 2-3 раза вероятность обнаружения танка инфракрасными головками самонаведения, во всех диапазонах радиолокации заметность боевой машины снижается до 10 раз. В радиотепловом диапазоне танк с "Накидкой" на экране оператора или для головки самонаведения почти сливается с фоном.

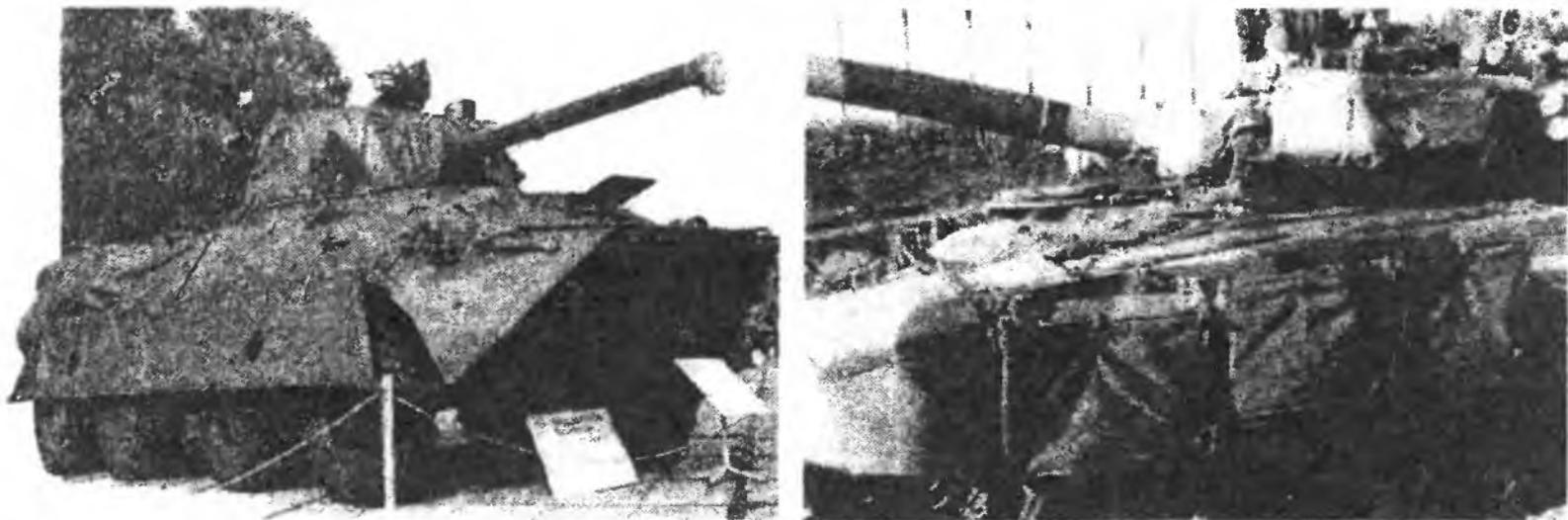


Рис. 9.1. Применение комплекта "Накидка" для маскировки наземной техники

Известно, что американский летающий радар E-8С "Джей старс" способен по вторичным доплеровским признакам отличать колесную технику от гусеничной с расстояния 180 км. Использование фартуков спереди и сзади танка, а также удлиненных бортовых экранов из комплекта "Накидки" уменьшает дистанцию обнаружения до 30-40 км. Для системы прицеливания ракеты танк, закрытый "Накидкой", также не исчезает полностью, но возможность самонаведения возникает слишком поздно. Пилот самолета или вертолета должен производить пуск ракеты в последний момент, почти "под себя", что практически невозможно.

Комплект защиты для танка состоит из 8-10 деталей, раскроенных по основным его элементам: башня, лобовой лист, крыша моторного отсека и т.д. Толщина материала составляет порядка 8 мм [405].

Для снижения радиолокационной сигнатуры танка Т-80У было разработано и применено специальное радиопоглощающее покрытие. Снижение эффективной

поверхности рассеивания наземных боевых машин приобрело особое значение после появления авиационных систем радиолокационной разведки в реальном масштабе времени с использованием РЛС бокового обзора с синтезированной апертурой, обеспечивающей высокое разрешение.

Для маскировки объектов применяются специальные маскирующие сети и пенные экраны, которые создаются пеногенерирующими установками. Последние годы ведутся интенсивные работы по снижению радиолокационной заметности военных объектов, особенно боевых самолетов и кораблей. Их реализация привела к уменьшению эффективной площади рассеяния в 10 и более раз.

9.2.2. Снижение радиолокационной заметности воздушных и надводных целей

Для снижения радиолокационной заметности самолетов широко используются различные средства. Так, например, в межконтинентальном стратегическом многорежимном ракетоносце Ту-160 в хвостовом конусе размещены многочисленные контейнеры с ИК ловушками и дипольными отражателями.

Работы по снижению заметности надводных кораблей в радиодиапазоне были начаты в 60-е годы НИИ ВМФ СССР и промышленности. Создавались специальные стенды, на которых в лабораторных условиях на моделях кораблей определялись параметры вторичного (отраженного) радиолокационного поля. У истоков создания стендов стояли такие ученые, как В.Д. Плахотников, Л.Н. Гриненко, Д.В. Шанников, В.О. Кобак, В.П. Пересада, Е.А. Штагер (впоследствии ведущие специалисты в области исследования радиолокационных характеристик кораблей).

Для исследования радиолокационных характеристик в натуральных условиях созданы специальные измерительные комплексы. Введены в эксплуатацию стационарные радиолокационные полигоны на Балтийском и Черном морях. Первый из них в заливе Хара-Лахт в Эстонии принадлежал 1-му ЦНИИ МО и располагал радиолокационным измерительным комплексом РИК-Б. На нем впервые исследованы параметры вторичного радиолокационного поля отечественных кораблей в натуральных условиях. Выполнение этой работы поручалось Г.А. Печко и В.М. Горшкову. Полигон в Севастополе был дополнительно укомплектован несколькими специализированными радиолокационными станциями с высоким разрешением по двум координатам и трехчастотной разных диапазонов и назначений. Особая заслуга в его создании принадлежит Е.А. Штагеру. В связи с утратой измерительных комплексов в Эстонии и на Украине основная нагрузка в части измерения параметров вторичного радиолокационного поля кораблей ВМФ ныне легла на район г. Приморска Ленинградской области, куда в 1993 г. перебазировался полигон 1-го ЦНИИ МО.

Результаты измерений радиолокационных характеристик отечественных кораблей за период 60-90-х годов позволили создать атлас, в который вошло большинство кораблей и судов ВМФ. Было установлено, что на поверхности любого надводного корабля существуют области интенсивного локального отражения,

которые вносят основной вклад в отраженное поле. Это обстоятельство, помимо разработки метода расчета средней эффективной поверхности рассеяния корабля, обусловило развитие разработки методов и средств радиолокационной защиты. Исследования, выполненные организациями ВМФ и промышленности, показали, что для уменьшения интенсивности отражения радиолокационных сигналов необходимо преобразовать сильноотражающие корабельные конструкции в малоотражающие путем придания корабельным конструкциям малоотражающих форм (архитектурные решения), а также использовать радиопоглощающие материалы.

Работы по созданию корабельных радиопоглощающих материалов были начаты в 50-е годы. В это время разработаны радиопоглощающие покрытия - "Тент", "Кольчуга", "Лист", "Щит". Однако первое поколение радиопоглощающих покрытий (РПП) не было внедрено в кораблестроение из-за больших массогабаритных характеристик, а также вследствие сложной технологии крепления их к защищаемым корабельным конструкциям. Для создания новых радиопоглощающих материалов привлечен более широкий круг организаций ВМФ, Академии наук, предприятий Минхимпрома, Миннефтехимпрома, Минцветмета, Минвузов и Минсудпрома. Большой вклад в эти исследования внесли такие ученые, как Ю.М. Патраков, А.П. Петренас, В.В. Кушелев, Ю.Д. Донков: они показали, что введение в стеклопластик полупроводящих углеродных тканей придает ему поглощающие свойства. В 1965 г. были получены первые образцы прочного радиопоглощающего углестеклопластика, получившего название "Крыло", из которого затем изготовлена надстройка разъездного катера. Применение этого материала позволило снизить отраженное поле судна в 5-10 раз. Так был создан первый практический радиопоглощающий конструкционный материал.

Для широкого внедрения радиопоглощающих средств на корабли необходимы покрытия с малым весом, малой толщины, прочные и стойкие к жестким морским условиям. Эти требования наложили свой отпечаток на характер и направление работ в этой области. В 1972-1974 гг. Ю.М. Патраковым, Р.И. Энглином, Н.Б. Бессоновым, Г.И. Бякиным были разработаны первые образцы тонкослойных поглотителей ("Лак", "Экран"). В 1976 г. первое покрытие "Лак" установили на одном из малых противолодочных кораблей. Результаты натурных испытаний показали, что покрытие "Лак" позволяет снизить отраженный сигнал в 5-10 раз.

Параллельно с РПП "Лак" в конце 70-х годов группой ученых под руководством А.Г. Алексеева осуществлена разработка и выполнены натурные испытания магнитоэлектрического покрытия ("Ферроэласт"). Его нанесли на большой противолодочный корабль. Эффективность этого покрытия примерно аналогична РПП "Лак". Дальнейшие работы по созданию третьего поколения корабельных покрытий связаны с поиском новых более эффективных наполнителей, усовершенствованием технологии нанесения ("Лак-5М"), расширением частотного диапазона и повышением поглощающих свойств ("Лак-1 ОМ"), снижением массогабаритных параметров ("Лакмус").

Работы по тепловой защите или снижению заметности надводных кораблей для тепловых (инфракрасных) систем были начаты с середины 50-х годов в 14-м НИИ ВМФ и 1-м ЦНИИ МО. На начальной стадии разработаны методики расчета теплового излучения кораблей, измерены распределения температур по поверхности корабля, предложен и испытан ряд средств тепловой защиты и ложных тепловых целей. С 1965 г. к работам подключился ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова в качестве головной организации отрасли. У истоков развития этого направления стояли С.Л. Брискин, С.Ф. Баев. В 1974 г. созданы базовые испытательные подразделения для натуральных измерений температурных полей кораблей в Севастополе, Калининграде, Северодвинске и Владивостоке. Систематические измерения, их анализ, методические разработки привели к существенному расширению номенклатуры применяемых средств тепловой защиты и к снижению уровня теплового излучения кораблей до значений, соответствующих лучшим зарубежным кораблям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема разработки новых материалов и технологий создания электромагнитных экранов с улучшенной гибкостью, эффективностью, воздухопроницаемостью весьма актуальна, особенно в настоящее время, когда электромагнитные ресурсы широко используются, число действующих радиоэлектронных средств постоянно увеличивается, а также обостряются проблемы экологической защиты живых организмов, обеспечения защиты информации и др.

В настоящей книге проведен анализ источников электромагнитного излучения естественного и искусственного происхождения, а также обсуждается влияние электромагнитных полей на организм животных и человека.

Рассмотрены перспективные методы изготовления гибких электромагнитных экранов и радиопоглощающих покрытий на основе машинно-вязаных полотен. В качестве сырья для таких полотен предложено использовать волокнистые материалы. Показана возможность использования трикотажной технологии для создания наборных элементов гибких конструкций экранов электромагнитного излучения. Разработана технология формирования упорядоченных геометрических неоднородностей в едином технологическом цикле на поверхности машинно-вязаных полотен с использованием прессовых и комбинированных переплетений.

Описаны методики синтеза волокнистых композитных никельсодержащих и кобальтсодержащих материалов путем химического восстановления ионов металлов из водных растворов с последующей стабилизацией электрофизических свойств синтезированных материалов поверхностно-активными веществами. Приводятся их структурные, электрические и микроволновые характеристики.

Рассмотрены основы измерения СВЧ параметров устройств электронной техники, а также основные принципы и конструкции измерителей коэффициента отражения, коэффициента передачи, S-параметров пассивных элементов. Разработана методика оценки экранирующих свойств гибких материалов.

Были разработаны объемные конструкции экранов электромагнитного излучения, содержащие в качестве наборных слоев машинно-вязаные полотна из волокнистых материалов. На основе таких конструкций получены радиопоглотители с коэффициентом отражения до -25 дБ и эффективностью 10-70 дБ в диапазоне частот 0,1 МГц – 118 ГГц.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. 7-е изд. - М., 1988. –513 с.
2. Максвелл Дж.К. Трактат об электричестве и магнетизме: В 2 т. - М.: Наука, 1989.
3. Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. Возбуждение электромагнитных волн. 2-е изд. - М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.
4. Алексеев А.Г., Холодов Ю.А. Электромагнитная безопасность // Вестн. СПбО РАЕН. - 1997. - N 1. - С.49-54.
5. Терлецкий В.А. О пользе и вреде излучения для жизни. – М.: Изд-во УРСС, 2001. - 66 с.
6. Бабушкин В.Е. Влияние электромагнитных излучений на здоровье человека // День Земли: экология и образование в Алтайском регионе: Матер. IV межвуз. конф. - Бийск: БиГПИ, 1998. - С.196-197.
7. Терлецкий Н.А. О возможных механизмах воздействия высокочастотных электромагнитных полей на биологические ткани // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999.
8. Еськов Е.К. Биологические эффекты низкочастотного электромагнитного поля // Фундамент. проблемы естествознания: Матер. Междунар. конгр. - СПб., 1998. - С.65-66.
9. Сергеенко Н.П., Гивишвили Г.В. Воздействие ионосферных возмущений на здоровье человека // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.103-104.
10. Влияние факторов активности Солнца и магнитных бурь на состояние и функциональную деятельность человека / Михайлов А.И., Шилов Г.В., Михайлов В.В. и др. // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.93-94.

11. Влияние магнитных полей 50 Гц на организм человека и животных / Никитина Н.Г., Томашевская Л.А., Бездольная И.С. и др. // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.96-97.

12. ЭМП и здоровье [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pole.com.ru>.

13. Влияние электрических и магнитных полей низкой частоты на организм человека / Аношин О.А., Кужекин И.П., Максимов Б.К., Никитин О.А. // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.79.

14. Кожокару А.Ф. Механизм энергоинформационного воздействия ЭМИ малой интенсивности // Проблемы электромагнитной безопасности человека: Тез. докл. 1 Рос. конф. - М., 1996.

15. Международный проект по электромагнитным полям. Медицинские и экологические последствия воздействия стационарных и переменных по времени электрических и магнитных полей (1996-2000 гг.) // Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России. - М., 1997. - С.89.

16. Зарницкий Г.Э. Вредное воздействие на окружающую среду электромагнитных полей высоковольтных ЛЭП // Технология. Сер.: Ресурсосберег. процессы, оборуд., материалы. - 1996. - Вып.3-4. - С.82-83.

17. Войтович Р.А., Глазер В.Л., Кадомская К.П. Влияние воздушных и подводных линий электропередачи на ихтиофауну пересекаемых водоемов // Изв. РАН. Энерг. - 1998. - N 6. - С.74-83.

18. Экологическая совместимость с окружающей средой кабельных линий высокого напряжения / Войтович Р.А., Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Самуилов Д.А. // Электротехника. - 2000. - N 11. - С.51-54.

19. Беляев И.Я., Алипов Е.Д., Матрончик А.Ю. Зависимость биологических эффектов нетепловых электромагнитных полей от плотности клеток // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.37.

20. Биологические и экологические аспекты действия комбинированных электромагнитных излучений (ЭМИ) на сельскохозяйственных животных / Ипатова А.Г., Иванов В.Л., Козьмин Г.В., Козлов В.А. // Радиационная биология. Радиозэкология. - 1999. - Т.39, N 5. - С.583-587.
21. Алешенков М.С., Родионов Б.Н. Взаимодействие физических полей и излучений с биологическими объектами и защита от их негативного воздействия. - М.: МГУЛ, 1998.
22. Барнс Ф.С. Влияние электромагнитных полей на скорость химических реакций // Биофизика. - 1996. - Т.41, вып.4. - С.790-797.
23. Гурвич Е.Б., Новохатская Э.А., Рубцова Н.Б. Смертность населения, проживающего вблизи энергообъекта электропередачи напряжением 500 киловольт // Мед. труда и пром. экол. - 1996. - N 9. - С.23-27.
24. Анализ состояний организма человека в условиях естественного электромагнитного фона характерного для городской промышленной зоны и загородного полигона / Бородин А.С., Колесник А.Г., Колесник С.А. и др. // Мониторинг окружающей среды и проблемы солнечно-земной физики: Тез. докл. междунар. симп. - Томск, 1996. - С.19-20.
25. Колечицкий Е.С., Филиппов А.А., Шульгин В.Н. Мониторинг электромагнитных полей объектов энергетики // Вестник МЭИ: Экология и сбережение. - М., 1997. - С.49-52.
26. Худницкий С.С. Особенности воздействия низкочастотных электрических и магнитных полей на человека в бытовых условиях // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.109.
27. Влияние рентгеновских и электромагнитных импульсов на нервную систему и мозг // Дудкин А.О. и др. - Гатчина, 1997. - (Препр. / Петерб. ИЯФ; N 2186).
28. Рудаков М.Л. Электромагнитные излучения персональных ЭВМ: источники, опасности, стандарты, защитные мероприятия // Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине: Тез. 1 Междунар. конгр. - СПб., 1997. - С.217-218. Солонин Ю.Г. Компьютер и здоровье // Вестн. Сыктывкар. ун-та. Сер.4. - 1998. - Вып.1. - С.124-125.
29. Электромагнитная обстановка и оценка влияния ее на человека / Дьяков А.Ф., Левченко И.И., Никитин О.А. и др. // Электричество. - 1997. - N 5. - С.2-10.

30. Низкочастотные магнитные поля в производственных помещениях / Мо-
нахов А.Ф., Иванов А.В., Корочков В.В. и др. // Электромеханика и электротехноло-
гии: Тез. докл. III Междунар. конф., 14-18 сент. 1998 г., Клязьма. - Клязьма, 1998. -
С.433-434.
31. Будянская Э.Н. О преждевременных возрастных изменениях со стороны
основных гомеостатических систем организма пользователей видеодисплейных тер-
миналов (ВДТ) // Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине:
Тез. I Междунар. конгр. - СПб., 1997. - С.219.
32. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономиче-
ские требования и требования к производственной среде. Методы измерения. - Введ.
впервые 01.07.97. - М., 1996. – 13 с.
33. Санитарно-гигиенические нормы допустимой напряженности электроста-
тического поля на рабочих местах № 11-16-94. - Мн.: Мин-во здравоохранения РБ,
1994. – 7 с.
34. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Персональный компьютер: физические
факторы воздействия и здоровье пользователя // Энергия: Экон., техн., экол. - 1999. -
N 7. - С.29-33; N 8. - С.29-33.
35. Рудаков М.Л. Отечественные гигиенические нормы на электростатические
поля видеомониторов обеспечивают безопасность // Стандарты и качество. - 1999. -
N 5. - С.48-49.
36. Применение химической нанотехнологии для конструирования облегчен-
ных формоустойчивых электромагнитных экранов / Лыньков Л.М., Гуров А.И., За-
харов В.И., Богущ В.А. // 3 Междунар. аэрокосм. конгр. IAC'2000: Сб. тез., Москва,
23-27 авг. 2000 г. - М.: Междунар. фонд попечителей Моск. гос. авиац. технол. ун-та
им. К.Э. Циолковского; ООО "Науч.-техн. компания "Аффинор", Изд-во СИП РИА,
2000. - С.229.
37. Коваленко В., Владимиров Д. Экранирование электромагнитных волн //
Мир и безопасность. - 2000. - N 1. - С.6-9.
38. Чернозубов И.Е. Влияние излучений от компьютеров на здоровье челове-
ка // Сознание и физическая реальность. - 1998. - Т.3, N 6. - С.64-68.
39. Беркутов А.М., Гуржин С.Г., Прошин Е.М. Электромагнитный монито-
ринг учебных лабораторий в условиях радиотехнического вуза // Электромагнитные
поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн.

безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.139-140.

40. Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы: СанПиН 2.2.2.542-96. - М.: Госкомсанэпиднадзор России, 1996. – 56 с.

41. ГОСТ Р 50948-96. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности. - Введ. 01.07.97. - М., 1996. – 11 с.

42. Сравнительная оценка состояния здоровья женщин, имеющих длительный контакт с ВДТ / Осипова А.Ю., Андреев Ю.В., Сафонов А.Б., Рябов Ю.Г. // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.97-98.

43. Чернозубов И.Е. Компьютер и дети. - М.: Компания АЛЕС, 1998. - 96 с. - Библиогр.: с.95-96.

44. Косарев А.Б. Электромагнитные излучения систем тягового электроснабжения и их воздействия на экологию и жизнедеятельность людей // Изв. Акад. пром. экол. - 1999. - N 3. - С.21-24.

45. Косарев Б.И., Персидский С.В., Чавчанидзе Г.Д. Обеспечение жизнедеятельности монтеров пути в зонах электромагнитного влияния // Изв. Акад. пром. экол. - 1998. - N 2. - С.30-34.

46. Биологическая активность переменных магнитных полей, генерируемых в электропоездах / Мартынюк В.С., Темурьянц Н.А., Кучина Н.Б. и др. // Биомед. радиоэлектроника. - 1999. - N 2. - С.56-60.

47. Биологическая активность переменных магнитных полей, генерируемых в электропоездах / В.С. Мартынюк, Н.А. Темурьянц, Н.Б. Кучина и др. // Биомедицинская радиоэлектроника. - 1999. - № 2. - С. 15-23.

48. Ультранизкочастотные магнитные поля от электротяги как профессиональный фактор риска ишемической болезни сердца / Птицына Н.Г., Кудрин В.А., Виллорези Дж. и др. // Мед. труда и пром. экол. - 1996. - N 12. - С.22-25.

49. Характеризация сложных магнитных полей от электропоездов: основание для выбора экспозиции в биологических экспериментах / Птицына Н.Г., Виллорези Дж. и др. // Мед. труда и пром. экол. - 1996. - N 12. - С.22-25.

зи Дж., Копытенко Ю.А. и др. // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.100.

50. Сподобаев Ю.М., Кубанов В.П. Оценка риска от воздействия ЭМП комплексов телекоммуникационных технических средств // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.105-106.

51. Предельно допустимые уровни электромагнитного излучения радиосредств сотовых систем подвижной связи / Бузов А.Л., Кольчугин Ю.И., Никонова К.В. и др. // Электросвязь. - 1997. - N 10. - С.24-25.

52. Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой связи: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.8 / 2.2.4.019-94. - М.: Информ.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1995. – 7 с.

53. Антенно-фидерные устройства базовых станций подвижной связи: экологическая безопасность / Бузов А.Л., Казанский Л.С., Романов В.А., Сподобаев Ю.М. // Мобильные системы. - 1998. - N 2. - С.15-18.

54. Бузов А.Л., Кольчугин Ю.И., Пальцев Ю.П. Экологические аспекты электромагнитного излучения мобильных станций систем подвижной связи // Мед. труда и пром. экол. - 1996. - N 9. - С.17-19.

55. Григорьев Ю.Г., Гульченко Л.П. Влияние электромагнитных полей сотовых телефонов на головной мозг пользователей (современное состояние проблемы) // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.115-116.

56. Влияние электромагнитного поля мобильного телефона на биоэлектрическую активность мозга человека / Лебедева Н.Н., Сулимов А.В., Сулимова О.П. и др. // Биомед. радиоэлектроника. - 1998. - N 4. - С.3-12.

57. Худницкий С.С., Фоменко Т.В. Температурные реакции человека на электромагнитное излучение сотового телефона // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.117.

58. ГОСТ Р 50829-95. Безопасность радиостанций, радиоэлектронной аппаратуры с использованием приемопередающей аппаратуры и их составных частей. Общие требования и методы испытаний. - Введ. впервые 01.01.97. - М., 1996. - 37 с.

59. Рудаков М.Л. Модели биологических объектов при исследовании взаимодействия с электромагнитными полями в диапазоне радиочастот // Зарубежная радиоэлектроника. - 1998. - N 2. - С.68-75.

60. Барбашов Б.Г., Настаченко А.С. Облучение населения г. Ростова-на-Дону сигналами телевизионных и радиовещательных станций // Изв. вузов. Сев.-Кав. региона. Естеств. науки. - 1997. - N 4. - С.38-41.

61. Рудаков М.Л. Зарубежные гигиенические стандарты на параметры электромагнитных воздействий в диапазоне радиочастот // Зарубежная радиоэлектроника. - 1997. - N 8. - С.56-60.

62. Определение уровней электромагнитного поля в местах размещения передающих средств и объектов сухопутной подвижной радиосвязи ОВЧ и УВЧ диапазонов: Метод. указания: МУК 4.3.046-96. - М.: Информ.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996. – 8 с.

63. Определение уровней электромагнитных полей на рабочих местах персонала радиопредприятий, технические средства которых работают в НЧ, СЧ и ВЧ диапазонах: Метод. указания: МУК 4.3.677-97. - М.: Минздрав России, 1998. – 23 с.

64. Ефимов А.П., Павлов А.Н. Экология электромагнитных полей радиостанций звукового вещания // Техн. звук. вещания и оповещения / Моск. техн. ун-т связи и информат. - М., 2000. - С.2-17.

65. Определение уровней магнитного поля в местах размещения передающих средств радиовещания и радиосвязи кило-, гекто- и декаметрового диапазона: Метод. указания; МУК 4.3.679-97. - М.: Минздрав России, 1998. – 31 с.

66. Определение уровней электромагнитного поля в местах размещения средств телевидения и ЧМ-радиовещания: Метод. указания: МУК 4.3.045-96. - М.: Информ.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996. – 15 с.

67. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ): Санитарные правила и нормы: СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. - М.: Информ.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996. - 28 с.

68. Родионов Б.Н. Физико-технические основы использования космических систем для нормализации экологической обстановки // Тез. Докл. II МНТК "Пробле-

69. Родионов Б.Н. Влияние СВЧ- и КВЧ-излучений на энергоинформационную безопасность человека // Стратегическая стабильность. - 2000. - N 2. - С.60-65.

70. Определение уровней электромагнитного поля, границ санитарно-защитной зоны и зон ограничения застройки в местах размещения передающих средств радиовещания и радиосвязи кило-, гекто- и декаметрового диапазонов: Метод. указания: МУК 4.3.044-96. - М.: Информ.-издат. центр Госкосанэпиднадзора России, 1996.

71. Ицков В.Я. Электромагнитные поля в окрестности радиотехнических станций // Электромагнитные поля в биосфере. Т.1. Электромагнитные поля в атмосфере Земли и их биологическое значение. - М.: Наука, 1994. - С.101-108.

72. Определение плотности потока мощности электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 700 МГц - 30 ГГц: Метод. указания: МУК 4.3.043-96. - М.: Информ.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 1996.

73. Морпехи США смогут разогреть противника на расстоянии в 750 метров [Электронный ресурс]. - 2 марта 2001. - Режим доступа: http://www.lenta.ru/world/2001/03/02/non_lethal/.

74. США поджарят Ирак в микроволновке [Электронный ресурс]. - 17 марта 2003. - Режим доступа: <http://www.utro.ru/articles/20030317093712133476.shtml>.

75. Лыньков Л.М., Терех И.С., Борботько Т.В. Электромагнитное оружие массового поражения и защита информации // Современные информационные технологии: Мат. Межд. летней школы-семинара. / Браслав, 2003. С. 218-221.

76. Лобарев В., Парфенов Ю., Фортон В. Электромагнитный терроризм - угроза XXI века // Экология жилища. Ч.8: Сб. ст. и докл. Моск. ком. экологии жилища и центр. прессы. - М., 1999. - С.5-7.

77. Биологическое действие низкоинтенсивных экологических факторов на организм человека / Довгуша В.В., Кудрин И.Д., Тихонов М.Н. и др. // Экол. пром. пр-ва. - 1999. - Вып.1. - С.3-14; Вып.2. - С.9-22.

78. Гриняев С.Н., Родионов Б.Н. Возможные последствия воздействия низкоэнергетического электромагнитного излучения на генетический аппарат живой клетки // Вестн. нов. мед. технол. - 1999. - Т.6, N 1. - С.40-42.

79. Григорьев Ю.Г. Электромагнитное загрязнение окружающей среды как фактор воздействия на биологические объекты // Экол. системы и приборы. - 1999. - N 6. - С.29-32.

80. Петрусевич Ю.М., Бриллиантов Н.В. Взаимодействие электромагнитных полей с биосистемами и диэлектрические свойства белковых растворов // Вестн. МГУ. Сер. Физика. Астрономия. - 1994. - Т.35, N 4. - С.63-68.

81. Плеханов В.П., Никитина В.Н., Ляшко Г.Г. О частоте рисков специфических и неспецифических нарушений здоровья при воздействии электромагнитных излучений // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.99.

82. Гичев Ю.П., Гичев Ю.Ю. Влияние электромагнитных полей на здоровье человека: Аналитич. обзор / Сер. Экол. Вып.52. - Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 1999. - 91 с.

83. Григорьев О.А. Электромагнитные поля и здоровье человека. Состояние проблемы // Энергия: Экон., техн., экол. - 1999. - N 5. - С.26-32.

84. Кулкыбаев Г.А., Поспелов Н.И. Изменения электрической активности желудка и концентрации в крови катехоламинов под влиянием электромагнитных микроволн (экспериментальные исследования) // Мед. труда и пром. экол. - 2000. - N 5. - С.8-11.

85. Лебедева Н.Н. Нейрофизиологические механизмы биологического действия низкоинтенсивных электромагнитных полей // Радиотехника. - 1997. - N 4. - С.62-66.

86. Тихонов М.Н., Довгуша В.В. Электромагнитное излучение и человек. Ч.1. Под прицелом электромагнитных излучений // Экол. и промышленность России. - 2000. - Май. - С.42-46.

87. Тихонов М.Н., Довгуша В.В. Электромагнитное излучение и человек. Ч.2. Электросмог // Экол. и промышленность России. - 2000. - Июнь. - С.41-46.

88. Бескорсая Н.А. Исследование проникновения СВЧ-излучения в головной мозг человека // Актуальные проблемы физики. - Ярославль, 1997. - С.175-179.

89. Готовский Ю.В., Перов Ю.Ф. Электромагнитная безопасность в офисе и дома (видеодисплейные терминалы и сотовые телефоны). - М.: ИМЕДИС, 1998. – 176 с.
90. Егорова Е.М. Электромагнитные поля и жизнь // Дельфис. - 1999. - N 4(20). - С.60-65.; 2000. - N 1(21). - С.75-79.
91. Захаров В.Х. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и его последствия // Тез. докл. Всерос. науч.-техн. конф. "Экология и геофизика". - Дубна, 1995. - С.35-36.
92. Воздействие микроволновых излучений на клетки крови человека / Асаенко И.С., Валенко В.С., Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В. // "Медэлектроника-2002". Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: Мат. Межд. науч.-техн. конф. / Минск, 2002. С. 68-70.
93. Чукова Ю.П. Изотермические процессы взаимодействия электромагнитного поля с биообъектами // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 1996. - № 7. - 1997. - № 8. - С. 48-61.
94. Родионов Б.Н., Родионов Р.Б. О воспроизводимости результатов сверхслабых энергоинформационных воздействий на биологические объекты // Труды Международного конгресса "Научные основы энергоинформационных взаимодействий в природе и обществе" - Крым, 1997.
95. Гриняев С.Н., Родионов Б.Н. Возможные последствия воздействия низкоэнергетического электромагнитного излучения на генетический аппарат живой клетки.
96. Гаряев П.П. Волновой геном. - М.: Общественная польза, 1994.
97. Меркулов А.В. Современные средства контроля электромагнитной обстановки // Электромагнитные поля и здоровье человека: Материалы 2-й междунар. конф. "Пробл. электромагн. безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация", 20-24 сент. 1999 г., Москва. - М., 1999. - С.145-146.
98. Методические аспекты мониторинга электромагнитных полей на территории населенных пунктов / Минуллин Р.Г., Назаренко В.И., Зыков Е.Ю. и др. // Гигиена и санитария. - 1995. - N 4. - С.25-27.
99. Любимов В.В. Электромагнитная погода и мониторинг окружающей среды: опыт исследования и визуализации электромагнитной обстановки в производст-

венных и жилых помещениях // Корреляции биологических и физико-химических процессов с космическими и гелио-геофизическими факторами: Тез. докл. 4 междунар. пушинск. симп., 23-28 сент. 1996 г., Пушино, Моск. обл. - Пушино, 1996. - С.109-110.

100. Искин В.Д. Биологические эффекты миллиметровых волн и корреляционный метод их обнаружения. – Харьков: Основа, 1990.

101. Соловьев Г. Р. Магнитотерапевтическая аппаратура. – М.: Медицина, 1990.

102. Посудин Ю.И., Гобка Б.М., Затварский Б.М. Оптико-спектральные и лазерные методы исследования волосяного покрова лошадей. – М., 1991 – С. 28.

103. Бессарабов Б.Ф., Мельникова И. И. Продуктивность и естественная резистентность сельскохозяйственной птицы под влиянием лучей гелий-неонового лазера// Использование физ. и биол. факторов в вет. и животноводстве: Матер. Всесоюз. науч. конф., Витебск, 11 – 12 сент. 1991 г. – М., 1992. – С. 6.

104. Никитенко А.М. Продуктивность цыплят, полученных из яиц, обработанных лучами лазера// Использование физ. и биол. факторов в вет. и животноводстве: Матер. Всесоюз. науч. конф., Витебск, 11 – 12 сент. 1991 г. – М., 1992. – С. 97–98.

105. О.С. Христева, В.М. Малышев, О.В. Блядур и др. Результаты воздействия лазерного облучения на инкубационные качества яиц и эмбриональную жизнеспособность кур линий яичных кроссов. (Функциональные и биохимические аспекты морфологии домашних животных). – Кишинёв, 1990. – С. 38–41.

106. Веремей Э.И. Квантовая и магнитотерапия в ветеринарной хирургии// Использование физ. и биол. факторов в вет. и животноводстве: Матер. Всесоюз. науч. конф., Витебск, 11 – 12 сент. 1991 г. – М., 1992. – С. 8–9.

107. Вдовенко Е.И., Яроцкий Ю.В. Профилактика диорейных болезней молодняка крупного рогатого скота// Использование физ. и биол. факторов в вет. и животноводстве: Матер. Всесоюз. науч. конф., Витебск, 11 – 12 сент. 1991 г. – М., 1992. – С. 65–66.

108. Абрамов С.С. Использование лучистой энергии и аэроионизации в профилактике болезней телят// Использование физ. и биол. факторов в вет. и животноводстве: Матер. Всесоюз. науч. конф., Витебск, 11 – 12 сент. 1991 г. – М., 1992. – С. 3.

109. Калашник И.А. Аутотрансфузия облучённой ультрафиолетовыми лучами крови как метод патогенетической терапии хирургической патологии у крупного рогатого скота// Использование физ. и биол. факторов в вет. и животноводстве: Матер. Всесоюз. науч. конф., Витебск, 11 – 12 сент. 1991 г. – М., 1992. – С. 10–11.
110. В.В. Снитинский, А.М. Равлык, Г.В. Аксёнова и др. Влияние спектра освещения на гормонально-субстратный статус и продуктивность коров// Использование физ. и биол. факторов в вет. и животноводстве: Матер. Всесоюз. науч. конф., Витебск, 11 – 12 сент. 1991 г. – М., 1992. – С. 100–101.
111. Филипов И., Паскалев М. Исследование крепости костей у коров, облучённых ультрафиолетом// Red. med. ved. – 1992. – № 7. – С. 607–610.
112. Сокирко А.В. Вращение асимметричных клеток во внешнем электрическом поле// Биологические мембраны. – 1992. – № 4. – С. 432–439.
113. Арабаджи В.И. Инфразвук и биоритмы мозга человека//Биофизика. – 1991. – № 1. – С. 150–151.
114. Голант М.Б. Использование внешних когерентных и шумовых сигналов для ускорения перехода клетки, являющейся недовозбуждённым резонансным генератором, к режиму генерации// Электрон. техн. – 1991. – № 4. – С. 41–42, 63.
115. Димбилов Р.И. Последние достижения в исследовании электромагнитных явлений// Prot. Bull. – 1991. – № 126. – С. 22–26.
116. Любимов В.Е., Сительщиков А.И. Оценка биологического действия ЭМП УВЧ в процессе машинного доения электрофизиологическими методами. Реактивность и адаптация животных. – М., 1989. – С. 87–91.
117. И.И. Балковой, И.И. Гришин, В.А. Коржов и др. Лечение коров при мастите полем УВЧ// Ветеринария. – 1991. – № 3. – С. 46-48.
118. Маркова Л.М. Развитие температурного поля в веществе при электромагнитном воздействии. Процессы тепломассообмена в энергетических установках. – Мн., 1990. – С. 110–113.
119. Андреев Е.А., Харкянян В.Н. Эффекты воздействия низкоинтенсивного ЭМ излучения КВЧ диапазона на биологические системы. Спектроскопия немет. кристаллов. – Киев, 1990. – С. 156–160.

120. Черников Ф.В. Влияние некоторых физических факторов на колебание светорассеяния в воде и в водных растворах биополимеров// Биофизика. – 1990. – № 5. – С. 711–716.
121. Лебеденко В.Е., Шугуров О.О. Влияние волн СВЧ на вызванные потенциалы спинного мозга кошки// Радиобиология. – 1990. – № 3. – С. 400–404.
122. Яковская Е.А., Яковский А.Ф. Использование поляризованных, угловых и тепловых характеристик излучения в задачах дистанционного мониторинга растительных объектов. Косм. методы излучения биосферы. – М., 1990. – С. 77–82.
123. Змунда А., Тейлор Д. Полевая радиометрия при защите растений// Chem. and Ind. – 1990. – № 9. – С. 289–292.
124. Гусева Т.Е. Использование слабых магнитных полей для выращивания масляничных культур в условиях фитотрона. Семеновед. и стандартиз. масл. культур. – Краснодар, 1989. – С. 80–88.
125. Султанобаев А.С., Макунова Г.А., Гулаева А.Н. Влияние УФ света на растения при их облучении в начальный период жизни// 3-я Всесоюз. конф. по с-х радиол.: Тез. докл., Облинск, 2 – 7 июля 1990 г. – Облинск, 1990. – С. 64–65.
126. Изанов Ф.Я., Полевик Н.А., Жданов В.В. Влияние поляризационной пространственно временной структуры ЭМП СВЧ на всхожесть семян растений// 3-я Всесоюз. конф. по с-х радиол.: Тез. докл., Облинск, 2 – 7 июля 1990 г. – Облинск, 1990. – С. 96–97.
127. Дмитриев А.М., Горбачевич Н.А., Сгирацкевич Л.К. Опыт использования магнитного поля лазерного излучения для повышения качества посевного материала в хозяйствах Белоруссии// 3-я Всесоюз. конф. по с-х радиол.: Тез. докл., Облинск, 2–7 июля 1990 г. – Облинск, 1990. – С. 75–76.
128. Селевич Т.А. Влияние лазерной фотоактивности семян на начальные этапы её ортогенеза. – Гродно, 1991. – С. 7.
129. Раджобов А.Р. Электротехнология в растениеводстве и хлопководстве в зоне орошаемого земледелия. – Ташкент, 1989. – С. 85.
130. Н.Д. Полевик, Н.Д. Никонова, Н.М. Семенова и др. Влияние предпосевной обработки семян амплитудно-манипулированным электромагнитным полем сверхвысокой частоты на рост и развитие козлятника восточного. Козлятник восточный – проблемы возделывания и использования// 1-й Всесоюз. научно-

131. Като Р. Влияние магнитного поля на рост первичных корней культуры. – Токио, 1988. – С. 1215 – 1219.

132. Укай Я. Влияние гамма-облучения семян на рост каллуса, полученного из зрелого зародыша или целого семени ячменя. – Токио, 1988. – С. 292–300.

133. Журенко Е.В., Черепнёв А.С., Кизилова Е.Г. К вопросу об исследовании экспресс-метода регистрации интенсивности влагопоглощения прорастающих семян и исследование влияния э/м полей на их посевные качества. – Харьков, 1988. – С. 8.

134. Б.И. Авраменко, В.Г. Володин, З.И. Лисовская и др. Метод получения исходного материала для селекции зерновых с помощью комбинированного облучения семян лазерным светом и ионизирующей радиацией// Тезисы 55–56-й Всесоюз. науч. конф. “Применение низкоэнергетических физических факторов в биологии и сельском хозяйстве“, Киров, 3–6 сент. 1989 г. – Киров, 1989. – С. 3.

135. А.Ф. Кучин, Е.В. Журенко, В.А. Черепнёв и др. Методы получения экспресс-информации в системе автоматизированного поиска параметров при изучении воздействия электромагнитных полей на с/х культуры с целью повышения их продуктивности. – Харьков, 1990. – С. 9.

136. Суров В.А. Реакция сортов на оптическое излучение. Новое в селекции и семеноводстве с/х культур. – М.: Урожай, 1987. – С. 72–76.

137. И.С. Сагер, В.О. Смит, И.Л. Эдвард. Влияние излучений окружающей среды на эффективность фотосинтеза и фоторавновесия фитохрома у растений. – Нью-Йорк, 1988. – С. 1882–1889.

138. Мисюк Л.А., Гусакова Л.П. О возможном участии цитоплазматических белков в реакции растительной клетки на действие магнитного поля. Применение э/м полей в сельском хозяйстве, исслед. и пр-ве. – М., 1988. – С. 89–94.

139. Серегина М.Т., Орлов В.В. Отзывчивость семян зерновых культур на предпосевную обработку в градиентном магнитном поле. Применение э/м полей в сельском хозяйстве, исслед. и пр-ве. – М., 1988. – С. 97–108.

140. Сейтхожаев А.И., Балан Г.И., Ильичев С.С. Действие гамма-лучей на межродовые гибриды озимой пшеницы// Частотная генетика растений. – 1989. – Т. 2.

141. Матвеев Л.П. Использование лазерного облучения пыльцы перед скрещиванием в селекции ярового ячменя. Системы интенсивного культивирования растений. – М.: Урожай, 1987. – С. 129–136.

142. А.Ю. Приялгаускепе, А.М. Рудзянскайте, В.М. Ранчампе и др. Повреждение хромосом, ДНК и репарация ДНК в клетках и протопластах растений, облучённых УФ светом// 5-й съезд Всесоюзного общества генетиков и селекционеров: Тез. докл. – Вильнюс, 1987. – С. 225–226.

143. Якобенчук В.Ф. Повышение урожайности зерновых культур путём допосевного светолазерного облучения семян// Передчірне та чірська землеробство. – 1986. – № 31. – С. 42–45.

144. Мартыненко А.И. Аппаратура для электрофизиологических исследований растений. Электрофизиологические методы в изучении функционального состояния растений. – М., 1988. – С. 107–116.

145. В.В. Муравьев, А.А. Тамело, Н.Х. Федосова и др. Устройство для повышения выживаемости ооцитов: А. С. 2457 РБ, МК4 А1 J7/ Бюлл. изобретений. 1994. № 3.

146. В.В. Муравьев, А.А. Тамело, Г.А. Годун и др. Устройство для лечения мастита у коров: А. с. 1782488 РБ, МК4 А61 J5/ Бюлл. изобретений. 1992. № 47.

147. Казначеев В.П., Михайлова Л.П. Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей. – Новосибирск, 1985. – 182 с.

148. Девятков Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. – М.: Радио и связь, 1991. – 168 с.

149. Платохин М. В. Иглотерапия в ветеринарии. – М.: Колос, 1966. – 264 с.

150. Тамело А.А., Муравьев В.В., Федосова Н.Х. Комплексный спектр электромагнитных волн в биотехнологии и терапии// Междунар. конф.: Тез. докл., Малберта, сент. 2001 г. – Малберта, 2001. – С. 5.

151. В.В. Муравьев, А.А. Тамело, Н.Х. Федосова и др. Электромагнитная волновая терапия для лечения мастита у коров// Весці Акадэміі аграрных навук. – 1993. – № 3.

152. ГОСТ 12.1.006-84 Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 8 с.

153. ГОСТ 12.1.002-84 Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах. - М.: Изд-во стандартов, 1985. – 4 с.
154. Т.В. Борботько, В.А. Богуш, Л.М. Лыньков, В.А. Петрова. Гибкие сетчатые экраны изготовленные машинно-вязаным способом // Современные средства связи: Мат. Межд. науч.-техн. конф. / Нарочь, 2001. С. 140-142.
155. ГОСТ 12.4.172-87 Комплект индивидуальный экранирующий для защиты от электрических полей промышленной частоты. Общие технические требования и методы контроля. М.: Изд-во стандартов, 1987. – 9 с.
156. Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, В.А. Богуш, Н.В. Колбун. Конструкции гибких поглотителей электромагнитной энергии СВЧ диапазона // Доклады БГУИР. – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 92-101.
157. Лыньков Л.М., Борботько Т.В. Широкодиапазонные экраны энергии ЭМИ для защиты биологических объектов // “Медэлектроника-2002”. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: Мат. Межд. науч.-техн. конф. / Минск, 2002. С. 70-73.
158. Л.М. Лыньков, В.П. Глыбин, В.А. Богуш, Т.В. Борботько. Структура кобальтсодержащих материалов, полученных на основе модифицированного полиакрилонитрила // Доклады НАН РБ. – 2002. – Т. 46, № 3. – С. 120-122.
159. Халяпин Д.Б., Шерстнева Ю.А. Защита информации, обрабатываемой ПЭВМ и ЛВС, от утечки по сети электропитания // Системы безопасности. 1999. № 28. С. 70–71.
160. Борботько Т.В. Гибкие радиопоглощающие материалы как средство локализации побочных электромагнитных излучений и наводок // Использование информационных ресурсов и сетевых технологий: Мат. Республ. науч.-практ. конф. / Минск, 2002. С. 98-99.
161. Акимов В.И., Семенов Н.С. Методы и средства защиты информации от утечки по каналам ПЭМИН // Системы безопасности. 1999. № 28. С. 76-77.
162. Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, Е.А. Сеньковец, В.С. Валенко. Эксплуатация источников электромагнитного излучения // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. - № 1(13)/1. С. 156-158.
163. Андрианов В.И., Бородин В.А., Соколов А.В. Шпионские штучки и устройства для защиты объектов и информации. М.: Полигон-АСТ, 1996. – 205 с.

164. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л.: Энергия, 1975. - 112 с.
165. Электрорадиоматериалы: Учеб. пособие / Б.М. Тареев, Н.В. Короткова, В.М. Петров, А.А. Преображенский; Под ред. Б.М. Тареева. М.: Высш. шк. 1978. - 336 с.
166. Никольский В.Н. Теория электромагнитного поля. 3-е изд. М.: Высш. шк. 1964. - 384 с.
167. Ковнеристый Ю.К., Лазарева И.Ю., Раваев А.А. Материалы, поглощающие СВЧ-излучения. М.: Наука, 1982. - 164 с.
168. Пат. 5892476 США, МПК H 01 Q 17/00. Electromagnetic radiation absorptive composition containing inorganic microparticles / Wayne Laval Gindrup, Rebecca Reeves Vinson, Christofer Richard Sutter (США); Spectro Dynamics Systems. № 681767; Заявл. 8.04.91; Оpubл. 6.04.99; НПК 342/1. С. 4.
169. Пат. 6245434 США, МПК B32B 015/04. Radio wave absorber composition, radio wave absorber member, radio wave absorber, and method for producing radio wave absorber member / Yukuo Shinozaki, Mamoru Shinozaki (Япония); Takenaka Corporation. № 209899; Заявл. 11.12.1998; Оpubл. 12.06.2001; НПК 428/472.-15 с.
170. Пат. 4596670 США, МПК H01B 001/06. EMI shielding effectiveness of thermoplastics / Nan-I Liu, (США); TDK General Electric Company. № 545340; Заявл. 25.10.1983; Оpubл. 24.06.1986; НПК 252/511.-39 с.
171. Пат. 6284363 США, МПК B32B 005/16. Electromagnetic wave absorbing thermoconductive silicone gel molded sheet and method for producing the same / Takako Maeda, Mitsuhiro Fujimoto (Япония); Fuji Polymer Industries Company. № 267049; Заявл. 12.03.1999; Оpubл. 4.09.2001; НПК 428/328.-8 с.
172. Пат. 6355707 США, МПК G11F 0017/10. Coating material for shielding electromagnetic waves / Jin Ouk Jang, Jin Woo Park (Корея); Samhwa Paints Industries Company. № 604941; Заявл. 27.06.2000; Оpubл. 12.03.2002; НПК 523/137.-17 с.
173. Бочкарев А.М., Долгов М.Н. Радиолокация малозаметных летательных аппаратов // Зарубежная радиоэлектроника (1989), №2, 3-17.
174. Калинин Ю.Н., Кононов А.Ф., Костылев А.А., Левченко В.К. Сверхширокополосные методы и средства контроля радиолокационной заметности объектов // Зарубежная радиоэлектроника (1994), № 6, 17-36.

175. Ананьин Э.В., Ваксман Р.Г., Петриков Ю.М. Методы снижения радиолокационной заметности // Зарубежная радиоэлектроника (1994), № 4/5, 5-21.
176. Сташкевич А.И. Проблемные вопросы уменьшения радиолокационной заметности объектов // Зарубежная радиоэлектроника (1994), № 4/5, 3-4.
177. Алексеев А.Г., Штагер Е.А. Физические основы Stealth технологии // Вестник СПбО РАЕН (1997), №1/2, 139-146.
178. Боровиков В.А., Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции. Москва: Радио и связь (1978).
179. Фок В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. Москва: (1970).
180. Уфимцев П.Я, Метод краевых волн физической теории дифракции. Москва: Сов. радио (1962).
181. Шнейдерман Я.А. Радиопоглощающие материалы // Зарубежная радиоэлектроника (1975), № 2, 93-114.
182. Шнейдерман Я.А. Новые радиопоглощающие материалы // Зарубежная радиоэлектроника (1972). № 7, 102-133.
183. Huang-Jan Chan/ EMI shielding plastics: A review // Adv. Polym. Technol., 14 (1995), № 2, 137-150.
184. Пирумов В.С., Алексеев А.Г., Айзикович Б.В. Новые радиопоглощающие материалы и покрытия // Зарубежная радиоэлектроника (1994), № 6, 2-8.
185. Алимин Б.Ф. Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов // Зарубежная радиоэлектроника (1989), № 2, 75-82.
186. Пирумов В.С., Алексеев А.Г., Айзикович Б.В. Новые радиопоглощающие материалы и покрытия // Зарубежная радиоэлектроника (1994), № 6, 2-8.
187. Бочкарев А.М., Долгов М.Н. Радиолокация малозаметных летательных аппаратов // Зарубежная радиоэлектроника (1989), №2, 3-17.
188. Металлополимерный поглощающий материал на основе карбонильного железа: патент РФ 1753497, МКИ Н 01 F. 1/26, Н 01 Q 17/00. БИ (1992), № 29, 201.
189. Многослойный поглотитель СВЧ энергии и способ его изготовления: патент РФ 1832352, МКИ Н 01 Q 17/00. БИ (1993), № 29, 80.

190. Комбинации слоев различных материалов в поглотителе излучения сантиметрового диапазона волн: патент США 4012738, МКИ Н 01 Q 17/00. РЖ "Изобретения за рубежом"(1977), №11, 49.

191. Поглотитель электромагнитных волн и способ его изготовления: патент РФ 1769274, МКИ Н 01 Q 17/00. БИ (1992), №38, 185.

192. Антиотражающая обшивка летательного аппарата: патент РФ 2006999, МПК НО1 Q 17/00, F41 Н 3/00. БИ (1994), №2, 176.

193. Петров Б.М., Семенихин А.И, Управляемые импедансные покрытия и структуры // Зарубежная радиоэлектроника (1994), № 4/5, 9-16.

194. Omastova M., Piontek J., Janke A., Kosina S. The processing and properties of conductiv polypropylene/polypyrrol composites. // 9 th Rolduc Polym. Meet Smart Polym/Mater/: Macromol/ Symp., 102 (1996), 265-272.

195. Пат. 4952935 США; МПК В 05 D 005/12. Radiowave absorber and its manufacturing process / Shinnosuke Sawa, Shunichi Kumaoka, Teruo Ohno (Япония); Shinwa International Co. № 1988000262777; Заявл. 26.10.88; Оpubл. 28.08.90; НПК 342/004. С. 4.

196. Пат. 339146 EP, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic wave absorber / Naito Yoshiyuki, Tokabashi Michiharu (Япония); Palmer, Roger et al. № 88303746.7; Заявл. 26.04.88; Оpubл. 23.12.92. С. 8.

197. Пат. 10226568 Япония, МПК С 04 В. 35/30 Electromagnetic wave absorber composition and its production / Hons Sung-Yong (Япония). № 09204586; Заявл. 30.07.97; Оpubл. 25.08.98. С. 3.

198. Пат. 4507354 США, МПК В 32В 7/00. Electromagnetic wave absorbers of silicon carbide fibers / Toshikatsu Ishikawa, Hiroshi Ichikawa, Yoshikazu Imai and others (Япония); Nippon Carbon С. № 477249; Заявл. 21.03.83; Оpubл. 26.03.85; НПК 428/245. С. 5.

199. The electromagnetic interface (EMI) and radio frecuency interference (RFI) shielding market // Polym. News. 23 (1998), №2, 58-59.

200. Петрухненко С.И., Сергеев В.И., Кацевман М.Л., Миронов И.А. Свойства полимерных материалов, экранирующих электромагнитные помехи // Пластические массы(1993), №2, 28-30.

201. Захаров А.И., Лосев Ю.П., Ершова О.А. и др. Композиционные материалы для электромагнитных экранов // Системы и средства телекоммуникаций (1992), № 4, 37-38.
202. Резиновая смесь для уплотнителей бытовых микроволновых печей: патент РФ 1610859, МПК С 08 L 9/00, Н 01 F 1/08. БИ (1993).
203. Крикоров В.С., Колмакова Л.А. Электропроводящие полимерные материалы. Москва: Энергоатомиздат (1984).
204. Шнейдерман Я.А. Радиопоглощающие материалы. III. Экранирующие радиопоглощающие материалы // Зарубежная радиоэлектроника (1975), №3, 71-93.
205. Водянин И.И., Щербак В.И. СВЧ приборы для средств радиоэлектронной борьбы // Зарубежная радиоэлектроника (1988), №12, 99-108.
206. Сафонова А.М., Лунева Н.К. Композиционные материалы для защиты от электромагнитного излучения // Сб. тр. междунар. конф. "Полимерные композиты-98" Гомель (1998), 314-317.
207. Универсальная экранированная камера: патентная заявка РФ 96103490/28, МПК G 12 B 17/02. БИ (1998), №11, ч.1, 120.
208. Поглотитель электромагнитных волн для безэховых камер: патент РФ 1755720, МКИ Н 01 Q 17/00. БИ (1992), №30, 234.
209. Пат. 40230174 США, МПК H01Q 017/00. Magnetic ceramic absorber /; Rufus W. Wright (США); The United States of America as represented by the Secretary of the Navy. № 063699; Заявл. 19.10.1960; Оpubл. 10.05.1977; НПК 342/4.-2 с.
210. Пат. 5940022 США, МПК H01Q 017/00. Electromagnetic wave absorber / Katsumi Takatsu (Япония); Zexel Corporation. № 055918; Заявл. 7.04.1998; Оpubл. 17.08.1999; НПК 342/1.-6 с.
211. Пат. 5574077 США, МПК G21F 001/10. Microwave-absorbing materials containing polar icosahedral molecular units and methods of making the same / Thomas K. Dougherty, Norman H. Harris, James R. Chow, Brian M. Pierce, David A. Whelan (Канада). № 159277; Заявл. 30.11.1993; Оpubл. 12.11.1996; НПК 523/137.-16 с.
212. Пат. 5366664 США, МПК H01B 001/00. Electromagnetic shielding materials / Vijay K. Varadan, Vasundara V. Varadan, Neil R. Williams, Joseph W. Cresko (США); The Penn State Research Foundation. № 878153; Заявл. 4.05.1992; Оpubл. 22.11.1994; НПК 252/512.-58 с.

213. Пат. 4972191 США, МПК H01Q 017/00. Wave absorber, and an anechoic chamber using the same / Ken Ishino, Taro Miura, Takashi Watanabe, Masashi Katsumata (Япония); TDK Corporation. № 385593; Заявл. 24.07.1989; Оpubл. 20.11.1990; НПК 342/1.-12 с.
214. Пат. 5394150 США, МПК H01Q 017/00. Broad-band radio wave absorber / Yoshiyuki Natio, Michiharu Takahashi (Япония). № 976373; Заявл. 13.10.1992; Оpubл. 28.02.1995; НПК 342/4.-5 с.
215. Пат. 5708435 США, МПК H01Q 017/00. Multilayer wave absorber / Toshio Kudo, Hideaki Tamura, Kenichi Noda (Япония); Mitsubishi Cable Industries, Ten Incorporated. № 589945; Заявл. 23.10.1996; Оpubл. 13.01.1998; НПК 342/1.-12 с.
216. Пат. 5617096 США, МПК H01Q 017/00. Broad-band radio wave absorber / Michiharu Takahashi (Япония). № 327387; Заявл. 21.10.1994; Оpubл. 1.04.1997; НПК 342/4.-15 с.
217. Пат. 6165601 США, МПК H01Q 017/00. Electromagnetic-wave absorber / Kenichi Noda, Takashi Sakurai (Япония); Ten Kabushiki Kaisha. № 262661; Заявл. 4.03.1999; Оpubл. 26.12.2000; НПК 428/215.-4 с.
218. Masaru Chino, Kazuo Kikuchi, Taro Hasegawa. Design of Two-layered Absorber Using Dielectrics// J. Inst. Telev. Eng. Jpn. 1977. V. 31. № 7. P. 565-571.
219. Alayli Y., Djouaher R. Interfluence of the Microwave Conductivity of a Composite Material: Potential Applications in EMI Shielding and Absorbers// Measur. Sci. Technol. 1997. V. 8. № 9. P. 793-797.
220. Nahmias M.E. Method and Means for Reducing Reflections of Electromagnetic Waves: Pat. 4030098 USA, 1977.
221. Ishikawa Toshikatsu, Ichikawa Hiroshi, Imai Yoshikazu, et al. Electromagnetic Wave Absorbers of Silicon Carbide Fibers. Pat. 4507354 USA, 1985.
222. Plessey Co Ltd. Radiation Absorbing Materials: Pat. 2058469 Great Britain, 1981.
223. Jaggard D.L., Eugheta N. Novel Shielding, Reflection and Scattering Control Using Chiral Materials. Pat. 5099242 Ц8А, 1992.
224. Daumen J.M.A., Timmerman A.T., Van Craenendouck M.A.C., Pues H.F. Chiral Absorbing Structure: Pat. 5229773 USA, 1993.

225. Пат. 4752525 США, МПК В351В 005/16. Wave absorber and method for making same / Tomio Oyachi, Hideo Tajima, Tatsuya Kanayama, Yasuhiro Ino, Minoru Ishiharada (Япония); Bridgestone Corporation. № 932491; Заявл. 20.11.1986; Оpubл. 21.06.1988; НПК 428/323.-8 с.
226. Пат. 4939024 США, МПК В32В 005/14. Radiowave absorbing body of the high electrical power-resistant type / Shigeru Oosawa, Haruyuki Yoshigahara, Toshio Yukuta (Япония); Grace Japan Kabushiki Kaisha. № 349015. 9.05.1989; Оpubл. 3.07.1990; НПК 428/218.-6 с.
227. Пат. 6061011 США, МПК Н05К 009/00. Nonflammable radio wave absorber / Osamu Yamamoto, Yasuhiro Oguna, Hiroo Takahashi, Yasuo Imashiro, Shun Hasegawa, Hidefumi Sano (Япония); Nisshinbo Industries, Nisshinbo Tempest. № 297616; Заявл. 4.09.1988; Оpubл. 9.05.2000; НПК 342/1.-7 с.
228. Пат. 5381149 США, МПК Н01Q 017/00. Broadband absorbers of electromagnetic radiation based on aerogel materials, and method of making the same / Thomas K. Dougherty, Norman H. Harris, James R. Chow, Brian M. Pierce (США); Hughes Aircraft Company. № 870532; Заявл. 17.04.1992; Оpubл. 10.01.1995; НПК 342/1.-45 с.
229. Пат. 2066508 С1 RU, МПК Н01Q17/00. Радиопоглощающий материал / Соколов Е.А., Савостьянов В.С., Прибыш С.В., Крицкая Д.А., Бабенко С.Д., Пономарев А.Н. - № 4542737/09; Заявл. 17.06.1991; Оpubл. 10.09.1996.
230. Пат. 6359581 США, МПК Н01Q 017/00. Electromagnetic wave absorber / Hiroshi Kurihara, Motonari Yanagawa (Япония); TDK Corporation. № 812557; Заявл. 21.03.2001; Оpubл. 19.03.2002; НПК 342/4.-12 с.
231. Пат. 5492749 США, МПК В32В 003/00. Absorber with optimized low frequency reflection / Jean-Yves Selves, Paul A. Kiciak (Франция) International Business Machines Corporation. № 286575; Заявл. 4.08.1994; Оpubл. 20.02.1996; НПК 428/172.-2 с.
232. Пат. 2110122 С1 RU, МПК Н01Q17/00. Сверхширокодиапазонный поглотитель электромагнитных волн / Александров Ю.К., Сидоров О.Н., Хохлов В.М. - № 9710369/09; Заявл. 11.03.1997; Оpubл. 27.04.1998.
233. Tsutaoka T., Ueshima M., Tokunaga T., etl al. Frequency Dispersion and Temperature Variation of Complex Pearmeability of Ni-Zn Ferrite Composity Materials// J. Appl. Phys. 1995. V. 78. № 6. P. 3983-3991.

234. Wartenberg B. Messung der electromagnetischen Stoffkonstanten μ und ϵ von Ferriten im mm-Wellengebiet// Z. Angew. Phys. 1968. ? 24. № 4. S. 211-217.
235. Krupka J., Geyer R.G. Complex Permeability of Demagnetized Microwave Ferrites Near and Above Gyromagnetic Resonance// IEEE Trans. Magn. 1996. V. 32. № 3. Pt. 2. P.1924-1933.
236. Amin M.B., James J.R. Techniques for Utilization of Hexagonal Ferrites in Radar Absorbers// Radio and Electronic Eng. 1981. V. 51. № 5. P. 209-225.
237. Thomson C.F. A Novel Ferrimagnetic Spinel for Absorbing UHF Electromagnetic Waves: Pat. 1367554 Great Britan, 1974.
238. Ken Ishino, Takashi Watanabe, Yasuo Hashimoto. Microwave Absorber: Pat. 4003840 USA, 1977.
239. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. Ленинград: Энергия (1969).
240. Suetake K. Microwave Absorbing Wall; Pat. 3460142 USA, 1969.
241. Kunuchiro S. Superwide Band Wave Absorber: Pat. 3623099 USA, 1970.
242. Ферритовый поглощающий элемент для широкой полосы частот: Пат. 54-27556 Япония, 1979.
243. Найто Е., Суэтаке К., Мацумура Х., Фудзивара Э. Исследование частот согласования СВЧ - поглотителей на основе ферритов // Денси цусин гаккай ромбунси. 1969. Т. 52-В. № 7. С. 398-404.
244. Dawson M.H., Suffredini L.R., O'Neal J.R. Antiradar Means and Techniques: Pat. 4173018 USA, 1979.
245. Hatakeyama K. Electomagnetic Wave Absorber for VHF to Uhf Band: Pat. 5179381 USA, 1993.
246. Naito Yo., Mizumoto T., Takahashi M. Broadband Wave Absorption Apparatus: Pat 5296859 USA, 1994.
247. Kim K.Y., Kim W.S., Jung H.J., Song H.S. Wideband Electromagnetic Wave Absorber: Pat 5323160 USA, 1994.
248. Kim K.Y., Kim W.S., Jung H.J., Ju Y.D. Wideband Electromagnetic Wave Absorber: Pat 5446459 Ц8А, 1995.

249. Nakamura K., Komori H., Oda M., Kanda K. Wide Bandwidth Electromagnetic Wave Absorbing Material: Pat. 5770304 USA, 1998.
250. Iha V., Banthia A. Composite based on waste-ferrites as microwave absorbers // Indian J. Phys. 1989. V. 63 N 5. P. 514-525.
251. Пат. 4003840 США, МПК В 65 D 43/00. Microwave absorber / Ken Ishino, Takashi Watanabe, Yasuo Hashimoto (Япония); TDK Electronics Company Ltd. № 576697; Заявл. 12.05.75; Оpubл. 18.01.77; НПК 252/62. С. 7.
252. Musal H.M., Hahn H.T. Thinlayer electromagnetic absorber design // IEEE Trans. Magn. 1989. V. 25. N 5. P. 3851-3853.
253. Пат. 6304209 США, МПК H01Q 017/00. Electromagnetic wave absorber in broad bands / Kennichii Noda (Япония); Ten Company. № 484568; Заявл. 18.01.2000; Оpubл. 16.10.2001; НПК 342/4.-7 с.
254. Пат. 4973963 США, МПК H01Q 017/00. Flat lattice for absorbing electromagnetic wave / Moriyoshi Kurosawa, Kazuo Wakabayashi, Tsutomu Miyata, Hiroyuki Tokita, Yoshiyuki Kitakoga, Yasuo Mizuno, Masaki Hikida, Tohimasa Hayashi (Япония); Seiko Instruments. № 273359; Заявл. 18.11.1988; Оpubл. 27.11.1990; НПК 342/4.-17 с.
255. Пат. 2094876 C1 RU, МПК H01F1/34. Радиопоглощающий ферритовый материал / Мартынов А.П., Маслов Е.Л., Никонов С.В., Покусин Д.Н., Субботин И.Ю., Титков А.Д., Федотова О.Л. - № 96111564/02; Заявл. 20.06.1996; Оpubл. 27.10.1997.
256. Пат. 5312678 США, МПК D03D 0037/00. Camouflage material / Jr. McCullough, P. Francis, Leo R. Novak, David M. Hall (США); The Dow Chemical Company. № 418045; Заявл. 6.10.1989; Оpubл. 17.05.1994; НПК 442/189.-27 с.
257. Пат. 5323160 США, МПК H01Q 017/00. Laminated electromagnetic wave absorber / Kyung Y. Kim, Wang S. Kim, Hyung J. Jung, Hue S. Song (Корея); Korea Institute of Science and Technology. № 915052; Заявл. 16.07.1992; Оpubл. 21.06.1994; НПК 342/1.-1 с.
258. Пат. 2155420 C1 RU, МПК H01Q17/00. Радиопоглощающее покрытие, способ получения и управления его свойствами и устройство для дистанционного измерения отражательных свойств покрытий на объектах в СВЧ диапазоне радиоволн / Шабанов С.Г. - № 2000100456/09; Заявл. 12.01.2000; Оpubл. 27.08.2000.

259. Пат. 5446459 США, МПК Н 01 Q 17/00. Wide band type electromagnetic wave absorber / Kyong Y. Kim, Wang S. Kim, Hyong J. Jung, Youn D. Ju (Корея); Korea Institute of Science and Technology. № 225754; Заявл. 11.04.95; Опубл. 29.08.95; НПК 342/1. С. 6.
260. Suetake K., Natio Yo. Extremely Thin Wave Absorbitive Wall: Pat. 3737903 USA, 1973.
261. Wright R.W. Combined Layers in a Microwave Radiation Absorber: Pat. 4012738 USA, 1977.
262. Тюлюковский Э.В. Разработка технологии получения электромагнитных экранирующих композитов для систем пассивной защиты от электромагнитного излучения // Вопросы материаловедения. 1998. № 1(14). С. 45-52.
263. Петров В.М., Мировицкий Д.М., Добровенский В.В. Радиопоглощающий материал: А.с. 1447179 СССР, 1986.
264. Мировицкий Ц.Н., Петров В.М. Самосогласованное поглощение электромагнитных волн слоем сегнетомагнитодиэлектрика // Радиотехника. 1989. №3. С.60-62.
265. Веневцев Ю.Н., Гагулин В.В., Любимов В.Н. Сегнетомагнетики. М.: Наука, 1982. 224 с.
266. Wood V.E., Austin A.E. Possible Applications for Magnetoelectric Materials // Magnetoelectric Interaction Phenomena in Crystals / Ed. Freeman A.J., Schmid H.L.; P.: Gordon and Breach Science Publishers, 1975. P. 181-193.
267. Петров В.М. Диэлектрические свойства сегнетоэлектриков в диапазоне сверхвысоких частот // Сегнетомагнитные вещества. М.: Наука, 1990. С. 152-164.
268. Поглотитель электромагнитных волн и способ. его изготовления: патент РФ 2119216, МПК Н 01 Q 17/00. БИ (1998), №26, ч.2, 273.
269. Gagulin V.V., Fadeeva N.V., Belous A.G., et al. New Rhenium Containing Seignettomagnets and Ferroelectrics // Phys. Status. Solidi A. 1978. V. 44. № 1. P. 247-257.
270. Добровенский В.В., Засовин Э.А., Мировицкий Д.Н., Черепанов А.К. Композиционные радиопоглощающие материалы со слоями из поглощающих дифракционных решеток // Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 2. С. 61-66.

271. Bruzzone C.L., Hoyle C.D. Electromagnetic-Power-Absorbing Composite Composite Compresing a Crystalline Ferromagnetic Layer and a Dielectric Layer, Each Having a Specific Thickness: Pat. 5925455 USA, 1999.

272. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения: Монография / Л.М. Лыньков, В.А. Богуш, В.П. Глыбин и др.; Под. ред. Л.М. Лынькова. – Мн.: БГУИР, 2000. – 284 с.

273. Крылов В.А., Юченкова Т.В. Защита от электромагнитных излучений. М.: Сов. радио, 1972. 139 с.

274. Тюхтин А.В. Рассеяние электромагнитных волн сплошными и сетчатыми экранами в движущихся средах // Электромагнитные волны и электронные системы. 1999. Т.4. № 1. С. 35-39.

275. Пат. 5892476 США, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic radiation absorptive composition containing inorganic microparticles / Wayne Laval Gindrup, Rebecca Reeves Vinson, Christofer Richard Sutter (США); Spectro Dynamics Systems. № 681767; Заявл. 8.04.91; Оpubл. 6.04.99; НПК 342/1. С. 4.

276. Михнюк Т.Ф., Шакиров Р.С., Котляр А.Д. Защита от электромагнитных излучений. Учеб. пособие по курсу "Охрана труда" для студентов радиотехнических специальностей. - Мн.: МРТИ. 1982. 79 с.

277. Экономическая безопасность предприятия / В.Б. Зубик, Д.В. Зубик, Р.С. Седегов, А. Абдула; Под ред. Р.С. Седегова, М.И. Плотницкого, А.С. Головачева. Мн.: Выш. шк. 1998. 391 с.

278. Пат. 4539433 США, МПК Н 05 К 9/00. Electromagnetic shield / Ishino Ken, Hashimoto Yasuo, Narumiya Yoshikazu (Япония); TDK Corp. - № 529991; Заявл. 07.09.83; Оpubл. 03.09.85; НПК 174/36. 11 с.

279. Виноградов Е.М. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств.-М., 1986. 247 с.

280. Пирумов В.С., Алексеев А.Г., Айзикович Б.В. Новые радиопоглощающие материалы и покрытия // Зарубежная радиоэлектроника. 1994. №6. С. 2-8.

281. Фармаковский Б.В. Новые нанокристаллические магнитомягкие материалы для создания широкополосных экранирующих композитов // XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. М. 1998 С. 509-510.

282. Пат. 5208599 США, МПК Н 01 Q 17/00. Serrated electromagnetic absorber / Rudduck Roger C., Burnside Walter D., Yang Chang-Fa (США); Ohio State University. № 751419; Заявл. 29.08.91; Оpubл. 04.05.93; НПК 342/4. С.13.

283. Пат. 4942402 США, МПК Н 01 Q 17/00. Radiation absorber and method of making it / Prewer Brian E., Milner Brian (США); Thorn Emi Electronics Ltd. № 262798; Заявл. 26.10.88; Оpubл. 17.07.90; НПК 342/1. С.5.

284. Пат. 4381510 США, МПК Н 01 Q 015/02. Microwave absorber / Lloyd W. Wren (США); The Boeing Co. № 294046; Заявл. 18.08.81; Оpubл. 26.04.83; НПК 343/909. С. 12.

285. Пат. 5617095 США, МПК Н 01 Q 17/00. Hybrid type wide band electromagnetic wave absorber / Dong-Young Kiu, Yeou-Choon Chung (Корея); Korea Research Institute of Standards and Science. № 543260; Заявл. 18.10.95; Оpubл. 1.04.97; НПК 342/1. С. 5.

286. Пат. 4164718 США, МПК Н 01 Р 1/22. Electromagnetic power absorber / Richard S. Iwasaki (США); California Institute of Technology. № 834257; Заявл. 15.09.77; Оpubл. 14.08.79; НПК 333/81 R. С. 6.

287. Пат. 4050073 США, МПК Н 01 Р 17/00. Support for foam absorber of electromagnetic waves / Wesch Ludwig (Германия). № 648937; Заявл. 14.01.76; Оpubл. 20.09.77; НПК 342/4. С.4.

288. Пат. 08274492 Япония; МПК Н 05 К 9/00. Electromagnetic wave shielding material / Kitamura Masanobu, Ishikura Makoto, Isomura Makoto and others (Япония); Fuji Electrochem. Co. Ltd. № 07074113; Заявл. 30.03.95; Оpubл. 18.10.96. С. 2.

289. Пат. 09181474 Япония, МПК Н 05 К 9/00. Electromagnetic wave absorber member / Kitama masanobu, Nakayama Keiji, Ishikura Makoto and others (Япония); Fuji Electrochem. Co. Ltd. № 07337277; Заявл. 25.12.95; Оpubл. 11.07.97. С. 2.

290. Пат. 4888590 США, МПК Е 01 С 9/00. Aircraft runway / Chase Charles J. (США); Lockheed Corporation. № 225433; Заявл. 25.07.88; Оpubл. 19.12.89; НПК 342/3. С.10.

291. Иващенко И.А., Рунов А.В. Математическая модель и характеристики рассеяния совокупности реально проводящих объектов и тонких оболочек с произвольными электрическими параметрами // Радиотехника и электроника. Мн.: Высш. шк. 1992. Вып. 21. С. 116-121.

292. Пат. 5117229 США, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic wave absorber / Yoshio Niioka (Япония). № 598915; Заявл. 15.10.90; Оpubл. 26.05.92; НПК 342/1. С. 11.

293. Пат. 4103231 США, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic wave absorber / Yoshio Niioka (Япония). № 588078; Заявл. 25.09.90; Оpubл. 7.04.92; НПК 342/1. С. 9.

294. Пат. 875 957 АЗ ЕР, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic wave absorber / Kotsuka Youji (Япония); Kitagawa Industries Co Ltd. № 98107787.8; Заявл. 29.04.98; Оpubл. 28.04.99. С. 14.

295. Пат. 09831072 WO, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic wave absorption panels and material for same / Joshi Vikram, Kimura Kenichi, Paz De Araujo (США), Kiyokawa Hiroshi (Япония); Fujita Co. № 0000406; Заявл. 12.01.98; Оpubл. 16.07.98. 51 с.

296. Пат. 4522890 США, МПК В 21 D 39/00/ Multy-layer high attenuation shielding structure / Jack C. Volkers, William R. Conley (США); Illinois Tool Works Inc. № 540106; Заявл. 11.10.83; Оpubл. 11.01.85; НПК 428/624. 7 с.

297. Пат. 09812583 WO, МПК G 02 В 005/28. Multilayer interference coatings / John Simpson (Великобритания); The Secretary of state for defence. № 1997GB0002492; Заявл. 15.09.97; Оpubл. 26.03.98. 44 с.

298. Пат. 9074297 Япония, МПК Н 05 К 9/00. Radio wave absorber / Kurata Keiko, Aoyama Shigeo, Futagawa Youshihi and others (Япония); Hitachi Maxell Ltd. № 8185582; Заявл. 26.06.96; Оpubл. 18.03.97. С.2.

299. Пат. 10013082 Япония, МПК Н 05 К 9/00. Electromagnetic wave absorber / Oshima Kensho, Endo Mitso (Япония); Toson Corp. № 8167698; Заявл. 27.06.96; Оpubл. 16.01.98. С. 6.

300. Пат. 5872534 США, МПК Н 01 Q 17/00. High frequency broadband absorption structures / Ferdy Mayer (Франция); Fair-Rife Products Corp. № 942166; Заявл. 1.10.97; Оpubл. 10.02.99; НПК 342/1. С. 12.

301. Пат. 5537116 США, МПК Н 05 К 9/00. Electromagnetic wave absorber / Ken Ishino, Yasuo Hashimoto, Hiroshi Kuribara, Yoshihito Hirai (Япония); TDK Corp. № 420488; Заявл. 12.04.95; Оpubл. 16.07.96; НПК 342/1. 19 с.

302. Пат. 5576710 США, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic energy absorber / John F. Broderick, Noel J. Tessier, Michael S. Heafey, Michael T. Kocsik (США); Chomerics Inc. № 261386; Заявл. 16.06.94; Оpubл. 19.11.96; НПК 342/1. 16 с.

303. Пат. 5525988 США, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic radiation absorbing shroud / Robert W. Perkins, Todd J. Durant (США); ARC Technologies Inc. № 493709; Заявл. 22.01.95; Оpubл. 11.01.96; НПК 342/4. С. 8.

304. Пат. 5179381 США, МПК Н 01 Q 17/00. Electromagnetic wave absorber for VHF to UHF band / Kenichi Hatakeyama (Япония); NEC Corp. № 775042; Заявл. 11.10.91; Оpubл. 12.01.93; НПК 342/1. С. 10.

305. Пат. 4960633 США, МПК В 32 В 25/02. Microwave-absorptive composite / Misso Hiza, Hajinte Yamazaki, Kazuhiro Sugihara (Япония); The Yokohama Rubber Co. № 39922; Заявл. 20.04.87; Оpubл. 2.10.90; НПК 428/215. С. 5.

306. Пат. 5453745 США, МПК Н 05 К 9/00. Wideband wave absorber / Toshio Kudo, Kiyoshi Furukawa, Yoshiaki Ueda (Япония); Mitsubishi Cable Industries Ltd. № 155812; Заявл. 23.11.93; Оpubл. 26.09.95; НПК 342/1. С. 6.

307. Пат. 4118704 США, МПК G01S 007/36. Electromagnetic wave-absorbing wall / Ken Ishino, Hiroshi Yamashita, Nobuyuki Ono, Yasuo Hasimoto (Япония); TDK Electronics Company. № 782779; Заявл. 30.03.1977; Оpubл. 3.10.1978; НПК 342/4.-8 с.

308. Пат. 5296859 США, МПК В32В 007/00. Multi-component electromagnetic wave absorption panels / Vikram Joshi, Kenichi Kimura, Carlos A. Paz de Araujo (США), Hiroshi Kiyokawa (Япония); Symetrix Corporation, Fujita Corporation. № 782934; Заявл. 13.01.1997; Оpubл. 14.03.2000; НПК 428/212.-18 с.

309. Пат. 6037046 США, МПК Н01Q 017/00. Broadband wave absorption apparatus / Yoshiyuki Naito, Tetsuya Mizumoto, Michiharu Takahashi (Япония); Yoshiyuki Naito, Michiharu Takahashi. № 890632; Заявл. 28.05.1992; Оpubл. 22.03.1994; НПК 342/1.-1 с.

310. Пат. 5230763 США, МПК В32В 031/18. Process for manufacturing a surface element to absorb electromagnetic waves / Klaus Roth, Joachim Mellem (Германия); Isover Saint-Gobain. № 571867; Заявл. 24.08.1990; Оpubл. 27.07.1993; НПК 156/254.-5 с.

311. Гусинский А.В. Автоматические гомодинные анализаторы цепей миллиметрового диапазона волн с модуляцией измерительного и опорного сигналов. Кандидатская диссертация, Минск, МРТИ, 1991 г.

312. Гусинский А.В. Автоматизированный гомодинный анализатор цепей миллиметрового диапазона волн. Респ. НТК "Перспективы развития и применения автоматизированной радиоизмерительной аппаратуры", МНИПИ, Минск, 1990 г.

313. Schafer G.E. A modulated subcarrier technique of measuring microwave phase shifts. IRE Trans. on Instr., vol.IM-9, Sept. 1960, pp.217-219.
314. Cohn S.B. Weinhouse N.P. An automatic microwave range measurement system. "Microwave J.", N2, 1964.
315. Твёрдотельные устройства СВЧ в технике связи. Под ред. Гассанова Л.Г. Изд-во "Радио и связь", М., 1988 г.
316. Чупров И.И. Научно-технические основы проектирования многофункциональных анализаторов СВЧ цепей. Докторская диссертация, Каунас, 1987 г.
317. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей. Изд-во "Радио и связь", М., 1982 г.
318. Гусинский А.В., Кострикин А.М. Алгоритмы математической обработки в гомодинном анализаторе цепей с фазовой манипуляцией в опорном канале. В сборнике "Радиотехнические измерения в диапазонах ВЧ и СВЧ", тезисы докладов НТК, Новосибирск, 1986 г.
319. Engen G.F. An Improved for Implementing the Six-Port Technique of Microwave Measurements. IEEE Trans., vol.MTT-25, N12, 1977, pp.1080-1083.
320. Эли П. Методы измерений в полосе частот. ТИИЭР, т.55, N6, 1967 г.
321. Гомодинные анализаторы для исследования цепей СВЧ в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. / Елизаров А.С., Кострикин А.М., Гусинский А.В. и др. // Радиотехника и электроника, 1996. – Т. 41, № 5. С. 602-610.
322. Рейзенкинд Я. А., Следков В.А. Состояние и перспективы развития методов измерения параметров двухполюсников и четырехполюсников на СВЧ // Зарубежная радиоэлектроника, 1986, № 4, С. 30-60.
323. Елизаров А.С. Электрорадиоизмерения. – Мн.: Выш. шк. – 1986. – 320 с.
324. Механическая технология волокнистых материалов / Труевцев Н.И., Труевцев Н.Н., Кофман Д.М. и др. – М.: Изд-во "Легкая индустрия", 1969. – 608 с.
325. Абрамов С.А., Гусев В.П. Технология отделки трикотажных изделий. – М.: Изд-во "Легкая индустрия", 1973. – 472 с.
326. Кобляков А.И. Структура и механические свойства трикотажа. – М.: Изд-во "Легкая индустрия", 1973. – 240 с.

327. Шалов И.И., Далидович А.С., Кудрявин Л.А. Технология трикотажа. – М.: Легпромбытиздат, 1986. – 376 с.
328. Строганов Б.Б. Строение и способ выработки многослойного кулирного трикотажа // Теория и практика ресурсосберегающей технологии трикотажного производства и компьютерные методы его технологической подготовки: Тез. докл. конф. – Москва, 1993. – С. 24-25.
329. Гусева А.А. Кругловязальные двухфактурные жаккардовые машины. М.: Изд-во "Легкая индустрия", 1980. – 343 с.
330. Флерова Л.Н., Сурикова Г.И. Материаловедение трикотажа. – М.: Изд-во "Легкая индустрия", 1972. – 184 с.
331. Производство трикотажных изделий из высокообъемных нитей. / А.Д. Предводителева, Н.И. Малышева, Н.А. Голованова, М.Ф. Медведев. – М.: Легкая индустрия, 1970. – 216 с.
332. Гензер М.С., Костылева А.Н. Технология и оборудование cottonного производства. – М.: Изд-во "Легкая индустрия", 1970. – 456 с.
333. Баженов В.И., Бабинец С.В. Материаловедение трикотажно-швейного производства. – М.: Легкая индустрия. - 1971. – 176 с.
334. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение. – М.: Легпромбытиздат, 1989. – 217 с.
335. Марисова О.И. Трикотажные рисунчатые переплетения. – М.: Изд-во "Легкая индустрия", 1970. – 256 с.
336. Далидович А.С. Основы теории вязания. – М.: Изд-во "Легкая индустрия", 1970. – 432 с.
337. ГОСТ 8845-87 Полотна и изделия трикотажные. Методы определения влажности, массы и поверхностной плотности. – М.: Изд-во стандартов, 1987. - 7 с.
338. ГОСТ 8846-87 Полотна и изделия трикотажные. Методы определения линейных размеров, перекоса, числа петельных рядов и петельных столбиков и длины нити в петле. – М.: Изд-во стандартов, 1987. - 8 с.
339. Богуш В.А., Глыбин В.П. Эластичные экранирующие материалы, их структура и свойства. // Веснік Сувязі. - 1999. - № 1.- С. 126-129.

340. Применение эластичных материалов с упорядоченной структурой для повышения помехоустойчивости средств связи / В.А. Богуш, Л.М. Лыньков, Н.А. Титович, В.А. Петрова. // Известия Белорусской инженерной академии. – 1997. - № 1(3)/3. - С. 253–255.
- 341 Боровков В.В., Тимашев А.В. Использование никелевого покрытия для улучшения электрофизических свойств трикотажных материалов из одиночных микропроволок // Теория и практика ресурсосберегающей технологии трикотажного производства и компьютерные методы его технологической подготовки: Тез. докл. конф. – Москва, 1993. – С. 21.
342. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио. – 1979. – 216 с.
343. Особая роль системы "миллиметровые волны – водная среда" в природе / Н.И. Синицин, В.И. Петросян, В.А. Елкин и др. // Биомедицинская радиоэлектроника.-1998.-№ 1.-С. 47-51.
344. Особенности взаимодействия СВЧ-излучения с трикотажными конструкциями, содержащими водяные наполнители / Д.Н. Прокопович, В.А. Богуш, Л.М. Лыньков, В.А. Петрова // Известия Белорусской инженерной академии. – 1999. - № 1(7)/2. - С. 195-197.
345. Прудник А.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В., Ходыко Н.Г., Власова Г.И. Особенности пропитки анизотропных капиллярно-пористых материалов для экранов ЭМИ // Современные средства связи: Мат. Межд. науч.-техн. конф. / Нарочь, 2002. С. 162-164.
346. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Терех И.С., Колбун Н.В. Жесткие конструкции экранов ЭМИ для видеодисплейных терминалов // Современные средства связи: Мат. Межд. науч.-техн. конф. / Нарочь, 2003. С. 138-139.
347. Синицын Н.И., Петросян В.И., Елкин В.А. СПЕ-эффект // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2000. – № 8. – С. 83-93.
348. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Гусинский А.В., Колбун Н.В. Влияние СПЕ-эффекта на экранирующие свойства поглотителей электромагнитного излучения // Доклады БГУИР. – 2003. – Т. 1, № 2. – С. 139-141.
349. Петрунин В.Ф. Особенности структуры и свойств, перспективы использования ультрадисперсных (нано-) материалов // XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: Тез. докл. – Москва. – 1998. – С. 435-436.

350. Морохов И.Д. Физические явления в ультрадисперсных средах. – М. – 1984. – 138 с.
351. Харутдинов Р.Ф. Химия полупроводниковых наночастиц // Успехи химии. – 1998. – т. 67, № 2. – С. 109-122.
352. Радиозащитные материалы на основе металлических кластеров в полимерных матрицах. / Лыньков Л.М., Богуш В.А., Глыбин В.П., Селиверстова Т.С. // Материалы, технологии, инструменты. – 1998. – т. 3, № 2. – С. 61.
353. Баженов В.И., Бабинец С.В. Материаловедение трикотажно-швейного производства. М.: Легкая индустрия. – 1971. – 176 с.
354. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение. М.: Легпромбытиздат. – 1989. – 217 с.
355. Cellulose and cellulose derivatives / Edited by N.M Bikales and L. Segal. - N.Y.-London-Sydney-Toronto: Parts IV-V. – 1971.
356. Зверев М.П. Хемосорбционные волокна. М.: Химия. – 1981. – 192 с.
357. Воробьева Г.Я. Химическая стойкость полимерных материалов. М.: Химия. – 1981. – 296 с.
358. Ковтун Л.Г. Химическая технология отделки трикотажных изделий. М.: Легпромбытиздат. – 1989. – 232 с.
359. Никитин А.А. Некоторые специфические особенности электропроводящих химических волокон // Химические волокна. – 1993. - № 1, С. 25-29.
360. Федтке М. Химические реакции полимеров. – М.: Химия. – 1990. – 152 с.
361. Геллер Б.Э. Химическое модифицирование волокнообразующих полимеров с использованием реакции рекомбинационного присоединения // Химические волокна. – 1993. - № 3. – С.7-14.
362. Synthesis of the thin-film acidic Ti (IV) and Zr(IV) phosphates deposited on surface of fiber and investigation their properties / L. Lynkov, V. Glybin, T. Selivyorstova, V. Bogush // Phosphor, Sulphur and Silicon. – 1999. - Vol.147. - P. 37.
363. Sorbents from cellulosic fibres synthesis with the use of ion-molecular layering method / L. Lynkov, V. Glybin, T. Selivyorstova, V. Bogush // Proceedings of EWLP'98, Aveiro, August 30 – September 2, 1998. – Portugal. – 1998. - P.207-208.

364. Получение сорбционно-активных волокнистых материалов для контроля состояния и защиты окружающей среды и их свойства / Гальбрайт Л.С., Дружинина Т.В., Назарьина Л.А. и др. // Химические волокна. – 1993. - №5. – С. 49-52.

365. Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богуш В.А. Кластерные материалы на основе модифицированных полимерных волокон // МНТК "Новые информационные технологии в науке и производстве", Минск, 1998: материалы конф. – 1998. – С. 345-346.

366. Способ получения волокнистого ионообменного материала / Л.М. Лыньков, В.А. Богуш, В.П. Глыбин, Т.С. Селиверстова // Официальный бюллетень изобретений № 4. – 30.12.1998. – Заявка РБ на изобретение № 970240, 1997. - С. 52.

367 Богуш В.А. Синтез кластерных материалов на основе полимерных матриц // Тезисы докладов VI Республиканской НК студентов и аспирантов, Гродно, 22-24 апреля 1998 / Под. ред. В.А.Лиопо. – Гродно:ГрГУ. – 1998. - С. 18.

368 Волокнистые композиционные неорганические иониты на базе ферроцианидов и фосфатов некоторых d-элементов / В.А. Богуш, Л.М. Лыньков, В.П. Нестеренко и др. // Материалы XVI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии, С.Петербург, 23-28 мая 1998 / Российская академия наук. – Москва. – 1998. - Том 2. - С. 415.

369. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронооптический анализ. – М.: Металлургия. – 1970 – 108 с.

370 В.А. Богуш. Синтез и свойства волокон с наномолекулярными слоями неорганических ионитов // Тезисы докладов V Республиканской НК студентов и аспирантов, Гродно, 21-25 апреля 1997 / Под. ред. В.А.Лиопо. – Гродно:ГрГУ. – 1997. - С. 12.

371. Илларионов И.Н., Комаров А.П. Свойства химически металлизированных хемосорбционных волокон и области их применения // Химические волокна. – 1993.- № 5. – С.57-58.

372 Зелионкайте В.И., Жаунаускас А.И. Улучшение электропроводности полимеров путем образования сульфидов и селенидов меди (I) в их поверхностном слое // XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: Тез. докл. – Москва. – 1998. – С. 309-310.

373. Химическое осаждение металлов из водных растворов / В.В. Свиридов, Т.Н. Воробьева, Т.В. Гаевская, Л.И. Степанова; Под ред. В.В. Свиридова. – Мн.: изд-во "Университетское". – 1987. – 270 с.

374. Вансоновская К.М. Металлические покрытия, нанесенные химическим способом / Под ред. П.М. Вячеславова. – Л.: Машиностроение. – 1985. – 103 с.

375. Химизм металлизации стеклотканей / Павлов Н.Н., Павлова В.В., Кобранов К.И., Седова Н.В. // Химические волокна. – 1999. - № 2. – С. 27-29.

376. Свиридов В.В., Браницки Г.А. Использование реакций химического восстановления ионов металлов для получения ультрадисперсных металлов и наноструктурированных металлических систем // XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: Тез. докл. – Москва. – 1998. – С. 268-269.

377. Ершов Б.Г. Короткоживущие кластеры металлов в водных растворах: получение, идентификация и свойства // Изв. РАН, сер. химическая. – 1999. - № 1. – С. 1-15.

378. Кособудский И.Д., Кузнецов М.В., Севостьянов В.П. Новые композиционные материалы – металлические кластеры в полимерных частицах // XVI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: Тез. докл. – Москва. – 1998. – С. 343.

379. Чуристов К.В., Перекос А.Е. Структура и свойства малых металлических частиц // Металлофизика и новейшие технологии. – 1997. – т. 19, № 3. – С. 68-83.

380. Шалкаускас М., Вашкялис А. Химическая металлизация пластмасс. – Л.: Химия. – 1985. – 143 с.

381. Лыньков Л.М., Глыбин В.П., Богуш В.А. Особенности структуры и электрофизических свойств частиц никеля и сульфидов меди, закрепленных в волокнистых комплексах. // Доклады НАН РБ. – 1999. – Т. 43, № 6. – С. 106-107.

382. Bogush V., Glybin V., Lynkov L. Synthesis of inorganic nanoparticles in fiber polymers and their properties // Physics, Chemistry and Application of Nanostructure: Reviews and Short Notes to Nanomeeting'99. - World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. - 1999. - P.251-254.

383. Nanocrystalline metals and oxides I: pulsed electrodeposition / H. Natter, M. Schmelzer, S. Janßen, R. Hempelmann // Ber. Bunsenges. Phys. Chem. – 1997. – vol. 101, N. 11. – P. 1706-1713.

384. Богуш В.А., Глыбин В.П., Лыньков Л.М. Применение комплексов d-металлов на волокнистых комплексах для синтеза материалов с электропроводя-

щими и помехоподавляющими свойствами // XIX Всероссийское Чугаевское совещание по химии комплексных соединений: Тез. докл. – Иваново, 1999. – С. 340.

385. Вольдсет Р. Прикладная спектроскопия рентгеновского излучения. – М.: Атомиздат. – 1977. – 161 с.

386. Электрорадиоматериалы / Курлин М.В., Панова Я.И., Пасынков В.В., Таиров В.Н. – Л.: "Судостроение". – 1969. – 339 с.

387. Н.Г. Дроздов, Н.В. Никулин. Электроматериаловедение. – Учебник для проф.-техн. учебных заведений. Изд. 4-е. – М.: "Высшая школа" – 1973. – 312 с.

388. О.Ф. Деверо. Проблемы металлургической термодинамики. Пер. с англ./ Под. ред. Глазова В.М. – М.: Металлургия. - 1986. – 424 с.

389. Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение. – Л.: Химия. – 1981. – 304 с.

390. Богущ В.А. Применение комплексов d-металлов, закрепленных на полимерных волокнах, для синтеза материалов с электропроводящими и помехоподавляющими свойствами // Тезисы докладов VII Республиканской НК студентов и аспирантов по физике конденсированных сред, Гродно, 5-7 мая 1999 / Под. ред. В.А.Лиопо. – Гродно:ГрГУ. – 1999. - С. 25-27.

391. Structural characteristics and applications of zirconium dioxide formed by super high-speed thermal treatment / L.M. Lynkov, V.V. Soloviev, S.V. Zhdanovich, N.P. Petrov, V.A. Bogush // Solid State Crystals in Optoelectronics and Semiconductor Technology, Antony Rogalski, Rutkowski, Majchrowski, Zielinski, Editors, Proceedings of SPIE Vol. 3179, pp. 180–183, 1997.

392. Елизаров А.С. Автоматизация измерений параметров линейных невзаимных СВЧ четырехполюсников. – М.: Сов. радио. – 1978. – 167 с.

393. Радиоподавляющие свойства материалов на основе модифицированных полимерных волокон / В.А. Богущ, Л.М. Лыньков, В.П. Глыбин, А.И. Гуров, В.И. Захаров // Известия Белорусской инженерной академии. – 1998. - № 2(6)/1. - С. 79–83.

394. Radioprotective materials based on nanosize metal clusters in polymeric matrixes / L. Lynkov, V. Glybin, T. Selivyorstova, V. Bogush, A. Smirnov // Abstracts of ICSSC'98. - Zakopane, Poland. – 1998. - P. 230.

395. ГОСТ 8845-87. Полотна и изделия трикотажные. Методы определения влажности, массы и поверхностной плотности.

396. ГОСТ 8847-85. Полотна трикотажные. Методы определения разрывных характеристик и растяжимости при нагрузках меньше разрывных.

397. ГОСТ 12023-66. Материалы текстильные. Метод определения толщины

398. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Составитель Д.Р.Ж. Уайт Джермантаун, Мериленд, 1971-1973. Вып.1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. Сокращ. пер. с англ. Под ред. А.И. Сапгира. – М.: "Сов. радио". - 1977. – 352 с.

399. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Составитель Д.Р.Ж. Уайт Джермантаун, Мериленд, 1971-1973. Вып.3. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. Сокращ. пер. с англ. Под ред. А.И. Сапгира. – М.: "Сов. радио". - 1979. – 464 с.

400. Полонский Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио. – 1979. – 216 с.

401. Исследования экранирующих свойств эластичных материалов на основе дисперсных никеля и кобальта / Л.М. Лыньков, В.П. Глыбин, В.А. Богуш, Д.Н. Прокопович // Радиотехника и электроника. – 1999. - Вып. 24. – С. 102-105.

402. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г. Варламова. М.: Сов. радио, 1980. 480 с.

403. Лыньков Л.М., Борботько Т.В., Колбун Н.В. Патент С2 ВУ №1119; МПК H01Q11/00. Поглотитель электромагнитного излучения. Заявл. 04.04.2003.

404. Лыньков Л.М., Чембрович В.Е., Борботько Т.В. Гибкие конструкции поглотителей для электромагнитной маскировки наземных объектов // Доклады БГУИР. – 2003. – Т. 1, № 2/1. – С. 29.

405. Пат. 001272 С1 RU, МПК H01Q17/00. Накладка для маскировки наземной техники / Григорян В.А. - № 199900417 Заявл. 19.02.1999; Оpubл. 10.09.2000.

**Богущ Вадим Анатольевич,
Борботько Тимофей Валентинович,
Гусинский Александр Владимирович,
Лыньков Леонид Михайлович,
Тамело Александр Арсеньевич**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ.
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ**

Монография

Редактор *Н.П. Четиков*

Компьютерная верстка *В.Б. Лейзеронк*

Ответственный за выпуск *С.Л. Жукова*

Подписано в печать 10.12.2003. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура “Таймс”. Печать на ризографе
Уч.-изд. л. 17,65. Усл. печ.л. 25,38. Тираж 300 экз. Заказ 24.

УП “Бестпринт”. Лицензия ЛВ№260 от 11.09.2000.
220007, Минск, Фабрициуса, д.5, ком. 1.

Отпечатано в типографии УП “Бестпринт”.
220007, Минск, Фабрициуса, д.5, ком. 1.