

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет телекоммуникаций

Кафедра метрологии и стандартизации

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В 2 частях

Часть 2

С. В. Ляльков, Ю. А. Гусынина, В. Т. Ревин

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
для специальностей 1-45 01 01 «Инфокоммуникационные технологии
(по направлениям)» и 1-45 01 02 «Инфокоммуникационные системы
(по направлениям)»*

Минск БГУИР 2015

УДК 621.317.7(076.5)
ББК 31.22я73
М54

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра информационных систем и технологий учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет»
(протокол №8 от 26 февраля 2014 г.);

заведующий научно-исследовательской лабораторией научно-исследовательского учреждения «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» Белорусского государственного университета, кандидат технических наук, доцент А. Г. Будаи

Методы и средства измерений в инфокоммуникационных системах.
М54 Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2 : учеб.-метод. пособие / С. В. Ляльков, Ю. А. Гусынина, В. Т. Ревин. – Минск : БГУИР, 2015. – 119 с. : ил.
ISBN 978-985-543-078-1 (ч. 2).

Учебно-методическое пособие включает описание четырех лабораторных работ и предназначено для изучения методов измерения мощности и параметров цепей в СВЧ диапазоне, фазовых сдвигов, параметров двухполюсников, анализа спектра, параметров модуляции и нелинейных искажений сигналов. Приведены указания по оценке точности полученных результатов измерений.

Может быть использовано при выполнении лабораторных работ студентами других специальностей.

Часть 1-я издана в БГУИР в 2014 году.

УДК 621.317.7(076.5)
ББК 31.22я73

ISBN 978-985-543-078-1 (ч. 2)
ISBN 978-985-488-996-2

© Ляльков С. В., Гусынина Ю. А., Ревин В. Т., 2015
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Лабораторная работа МИ–5 «Измерение мощности и параметров цепей на СВЧ»..... | 5 |
| 5.1 Цель работы | 5 |
| 5.2 Краткие теоретические сведения | 5 |
| 5.3 Приборы, используемые при выполнении работы | 11 |
| 5.4 Описание лабораторного макета | 11 |
| 5.5 Подготовка к выполнению работы..... | 12 |
| 5.6 Задания к лабораторной работе | 13 |
| 5.7 Порядок выполнения работы..... | 13 |
| 5.8 Контрольные вопросы..... | 18 |
| Лабораторная работа МИ–6 «Измерение фазовых сдвигов и группового времени запаздывания» | 19 |
| 6.1 Цель работы | 19 |
| 6.2 Краткие теоретические сведения | 19 |
| 6.3 Приборы, используемые при выполнении работы | 25 |
| 6.4 Описание лабораторного макета | 25 |
| 6.5 Подготовка к выполнению работы | 27 |
| 6.6 Задания к лабораторной работе | 27 |
| 6.7 Порядок выполнения работы | 27 |
| 6.8 Контрольные вопросы | 32 |
| Лабораторная работа МИ–7 «Измерение параметров двухполюсников» | 35 |
| 7.1 Цель работы | 35 |
| 7.2 Краткие теоретические сведения | 35 |
| 7.3 Приборы, используемые при выполнении работы | 42 |
| 7.4 Описание лабораторного макета | 42 |
| 7.5 Подготовка к выполнению работы | 43 |
| 7.6 Задания к лабораторной работе | 43 |
| 7.7 Порядок выполнения работы | 44 |
| 7.8 Контрольные вопросы | 48 |
| Лабораторная работа МИ–8 «Измерение параметров спектра, модулированных сигналов и нелинейных искажений» | 50 |
| 8.1 Цель работы | 50 |
| 8.2 Краткие теоретические сведения | 50 |
| 8.3 Приборы, используемые при выполнении работы | 57 |
| 8.4 Описание лабораторного макета | 57 |
| 8.5 Подготовка к выполнению работы | 57 |
| 8.6 Задания к лабораторной работе | 58 |
| 8.7 Порядок выполнения работы | 58 |
| 8.8 Контрольные вопросы | 62 |
| Содержание отчета | 64 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | Ваттметр поглощаемой мощности импульсный МЗ-41 | 65 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б | Ваттметр поглощаемой мощности МЗ-51 | 70 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В | Генератор сигналов высокочастотный Г4-109 | 74 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г | Измеритель КСВН панорамный Р2-61 | 79 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д | Измеритель разности фаз Ф2-34 | 86 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е | Генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109 | 90 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж | Измеритель иммитанса Е7-14 | 93 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ И | Измеритель добротности Е4-7 | 96 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ К | Анализатор спектра СК4-58 | 101 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Л | Измеритель модуляции СКЗ-43 | 107 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ М | Измеритель нелинейных искажений С6-5 | 111 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Н | Генератор сигналов высокочастотный Г4-107 | 114 |
| ЛИТЕРАТУРА | | 118 |

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА МИ-5 ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ ЦЕПЕЙ НА СВЧ

5.1 Цель работы

5.1.1 Изучение методов измерения поглощаемой и проходящей мощностей в диапазоне сверхвысоких частот.

5.1.2 Изучение методов измерения параметров СВЧ цепей.

5.1.3 Приобретение практических навыков работы с измерительными приборами МЗ-41, МЗ-51, Р2-61, Г4-109.

5.2 Краткие теоретические сведения

Особенностью радиотехнических цепей, работающих на сверхвысоких частотах (СВЧ), является то, что их геометрические размеры соизмеримы с длиной волны распространяющихся в них колебаний, т. е. они представляют собой цепи с распределенными постоянными. Примеры таких цепей – волноводные, коаксиальные, полосковые и микрополосковые линии (тракты) передачи. Наиболее распространенными видами измерений в таких цепях являются измерение мощности, коэффициентов отражения (Γ) или коэффициентов стоячей волны по напряжению (КСВН) и коэффициентов передачи (ослабления).

5.2.1 При **измерении мощности** на СВЧ применяются два основных метода:

– измерение мощности, проходящей от источника в нагрузку (проходящей мощности);

– измерение мощности, которую источник может отдать в согласованную нагрузку (поглощаемой мощности).

Соответственно этим методам все ваттметры делятся на ваттметры проходящей мощности М2 и ваттметры поглощаемой мощности М3. Основными узлами ваттметра являются приемный преобразователь (ПП) и измерительное устройство (ИУ). ПП образуют самостоятельный вид измерителей мощности типа М5. В них осуществляется преобразование электромагнитной энергии в другой вид энергии, доступной для прямого измерения. По способу преобразования энергии вся совокупность существующих методов измерения мощности и ваттметров может быть классифицирована следующим образом:

– тепловые методы: калориметрический, болометрический (термисторный), термоэлектрический;

– электронные методы: ваттметры с использованием эффекта Холла, эффекта «горячих» носителей тока и частотно-избирательных ферритов.

5.2.1.1 При **измерении поглощаемой мощности** типовая схема включения ваттметра в передающий тракт показана на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 – Схема измерения поглощаемой мощности

ПП ваттметров поглощаемой мощности являются эквивалентом согласованной нагрузки и, как видно из рисунка 5.1, включаются на конце передающей линии вместо реальной нагрузки. Для измерения поглощаемой мощности используются все тепловые и большинство электронных методов.

Тепловые методы основаны на преобразовании электромагнитной энергии в тепловую с последующим измерением либо количества выделенного тепла (приращения температуры), либо замещающей мощности постоянного тока (или тока низкой частоты), вызывающей эквивалентное приращение температуры. Основным достоинством тепловых ваттметров является возможность калибровки и аттестации их на постоянном токе, что способствует достижению высокой точности измерения мощности. Более подробно тепловые методы рассмотрены в [1–4]. Наибольшее распространение в практике измерений получили болометрические (термисторные ваттметры), ПП которых являются терморезисторы (болометры и термисторы).

Общим для электронных методов является преобразование измеряемой мощности в пропорциональное напряжение постоянного или переменного тока с последующим измерением этого напряжения. Основным достоинством электронных методов является малая инерционность, благодаря чему они используются для прямого измерения средней и импульсной мощности.

Рассмотрим более подробно термоэлектрический метод и метод с использованием эффекта «горячих» носителей тока.

Термоэлектрический метод основан на использовании в качестве ПП термопар, позволяющих СВЧ энергию преобразовать в тепловую с последующим измерением возникающей термоЭДС E_T , пропорциональной рассеиваемой в термопаре СВЧ мощности. При этом термопары одновременно выполняют функции согласованной нагрузки и термометра. Значение E_T практически не зависит от температуры окружающей среды, поэтому нет необходимости в специальных схемах термокомпенсации. Кроме того, термопары не требуют начального подогрева, имеют высокую чувствительность и совместно с простым измерительным устройством позволяют реализовать термоэлектрические ваттметры прямого преобразования.

Конструктивно ПП термоэлектрических ваттметров представляют собой отрезки коаксиальных или волноводных трактов со встроенными термопарами, элементами согласования их с трактом и развязки цепей постоянного тока и СВЧ.

Поскольку выходным сигналом ПП является постоянное напряжение, то ИУ термоэлектрических ваттметров представляет собой вольтметр постоянного тока, шкала которого проградуирована в значениях измеряемой мощности.

Метод с использованием эффекта «горячих» носителей тока основан на разогреве носителей тока в полупроводниковых элементах, помещенных в сильное электрическое поле. При использовании полупроводникового элемента с точечным невыпрямляющим контактом разогрев носителей в области контакта оказывается неоднородным, вследствие чего на потенциальном барьере перехода металл – полупроводник возникает ЭДС, которую называют термоЭДС «горячих» носителей. Чувствительность такого преобразователя зависит от удельного сопротивления полупроводника, размеров контакта, его формы, высоты потенциального барьера и некоторых других параметров.

Конструктивно ПП ваттметров строятся на П-образном волноводе с размещенным в нем полупроводниковым элементом. ПП имеет большое выходное сопротивление по постоянному току (более 3 кОм) и поэтому его необходимо согласовать с сопротивлением тракта в широком диапазоне частот, и в практических конструкциях ПП вместо оконечной короткозамыкающей нагрузки устанавливается согласованная нагрузка.

ИУ ваттметров представляет собой вольтметр постоянного или переменного тока в зависимости от режима измерения.

5.2.1.2 Под **проходящей мощностью** понимают мощность, рассеиваемую в реальной нагрузке с КСВН > 1 ($\Gamma_H > 0$). Поэтому проходящая мощность $P_{\text{ПР}}$ всегда меньше падающей $P_{\text{ПАД}}$ на величину мощности, отраженной от нагрузки $P_{\text{ОТР}}$, т. е.

$$P_{\text{ПР}} = P_{\text{ПАД}} - P_{\text{ОТР}} = P_{\text{ПАД}} (1 - |\Gamma_H|). \quad (5.1)$$

Основным достоинством ваттметров проходящей мощности является возможность контроля значения $P_{\text{ПР}}$ без отключения реальной нагрузки. Для этого ПП ваттметров включаются в передающий тракт между источником и нагрузкой. Они отбирают из тракта лишь незначительную часть мощности, не искажая картину электромагнитного поля и не ухудшая характеристики согласования. В зависимости от типа ПП и способа включения их в линию передачи различают ваттметры проходящей мощности с направленными ответвителями (НО), поглощающей стенкой, пондеромоторные и с использованием эффекта Холла.

На рисунке 5.2 приведена структурная схема наиболее распространенного ваттметра с НО, ориентированными соответственно на $P_{\text{ПАД}}$ (НО1) и $P_{\text{ОТР}}$ (НО2). К выходам вторичных каналов НО1 и НО2 поочередно подключается ваттметр поглощаемой мощности, обеспечивая соответственно измерение $P_1 \approx P_{\text{ПАД}}$ и $P_2 \approx P_{\text{ОТР}}$. Так как НО характеризуются значениями переходного ослабления C между первичным и вторичным каналами НО, то формула для определения по результатам измерений P_1 и P_2 искомого значения $P_{\text{ПР}}$ принимает вид

$$P_{\text{ПР}} = \frac{P_1}{C_1} - \frac{P_2}{C_2}, \quad (5.2)$$

где C_1 и C_2 – переходные ослабления НО1 и НО2, определяемые как

$$C = \frac{P_{\text{ВК}}}{P_{\text{ПК}}} \text{ (в раз)}; C = 10 \lg \frac{P_{\text{ВК}}}{P_{\text{ПК}}} \text{ (дБ)}, \quad (5.3)$$

где $P_{\text{ПК}}$ – мощность в первичном канале НО;

$P_{\text{ВК}}$ – мощность, ответвленная во вторичный канал НО.

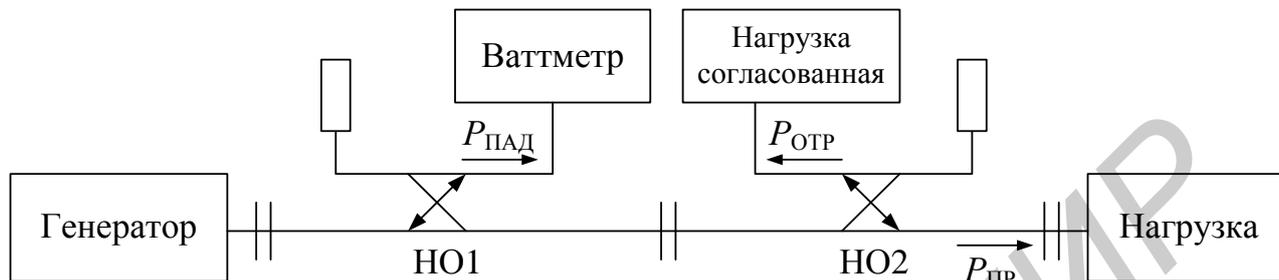


Рисунок 5.2 – Структурная схема ваттметра проходящей мощности с НО

В практике измерений $P_{\text{пр}}$ применяются ваттметры проходящей мощности и др. Подробно они рассмотрены в [1–4].

5.2.2 Режим работы линии при передаче энергии характеризуется **коэффициентом отражения (Γ)** и **коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН)**, которые определяются характером и значением полного сопротивления нагрузки линии \dot{Z}_H . Комплексный коэффициент отражения $\dot{\Gamma}$ определяется как отношение комплексной амплитуды напряжения волны, отраженной от нагрузки (\dot{U}_O), к комплексной амплитуде напряжения волны, падающей на нее ($\dot{U}_П$):

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{U}_O}{\dot{U}_П} = |\dot{\Gamma}| e^{j\varphi_\Gamma}. \quad (5.4)$$

Значение и характер $\dot{\Gamma}$ позволяет оценить качество согласования сопротивления нагрузки \dot{Z}_H с волновым сопротивлением тракта ρ . Количественно эта связь определяется выражением

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{Z}_H - \rho}{\dot{Z}_H + \rho}.$$

В технике СВЧ для оценки качества согласования часто пользуются значением КСВН. КСВН является действительной величиной и определяется как отношение максимальной (U_{max}) и минимальной (U_{min}) амплитуд напряжения электрического поля в линии передачи:

$$K_{\text{СТУ}} = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}}.$$

Связь между $\dot{\Gamma}$ и КСВН устанавливается соотношениями

$$K_{CTU} = \frac{1 + |\dot{\Gamma}|}{1 - |\dot{\Gamma}|}; \quad |\dot{\Gamma}| = \frac{K_{CTU} - 1}{K_{CTU} + 1}. \quad (5.5)$$

Описанные параметры полностью определяют измеряемые параметры двухполюсников (ДП). При исследовании четырехполюсников (ЧП) помимо коэффициентов отражения входа и выхода определяют также коэффициенты передачи (K) или ослабления (A) в прямом ($K_{ПР}$) и обратном ($K_{ОБР}$) направлениях:

$$K_{ПР} = \frac{\dot{U}_{ВХ}}{\dot{U}_{ВЫХ}}; \quad K_{ОБР} = \frac{\dot{U}_{ВЫХ}}{\dot{U}_{ВХ}}; \quad A = 20 \lg |K| \text{ (дБ)}, \quad (5.6)$$

где $\dot{U}_{ВХ}$ и $\dot{U}_{ВЫХ}$ – комплексные амплитуды напряжения волн на входе и выходе ЧП.

Для измерения описанных параметров на практике используют измерители параметров цепей с распределенными постоянными, которые образуют самостоятельную подгруппу Р и подразделяются на измерительные линии Р1, измерители КСВН и ослабления Р2, полных сопротивлений Р3 и S-параметров Р4. Самостоятельный вид Р5 образуют измерители параметров линий передачи, предназначенные для измерения характеристик неоднородностей.

Методы измерения, на которых базируются приборы перечисленных видов, можно разделить на три группы: основанные на анализе распределения поля стоячей волны в линии передачи (приборы видов Р1 и Р3); связанные с измерением отношений напряжений падающих, отраженных и прошедших волн (Р2 и Р4); основанные на импульсной (временной) рефлектометрии (Р5).

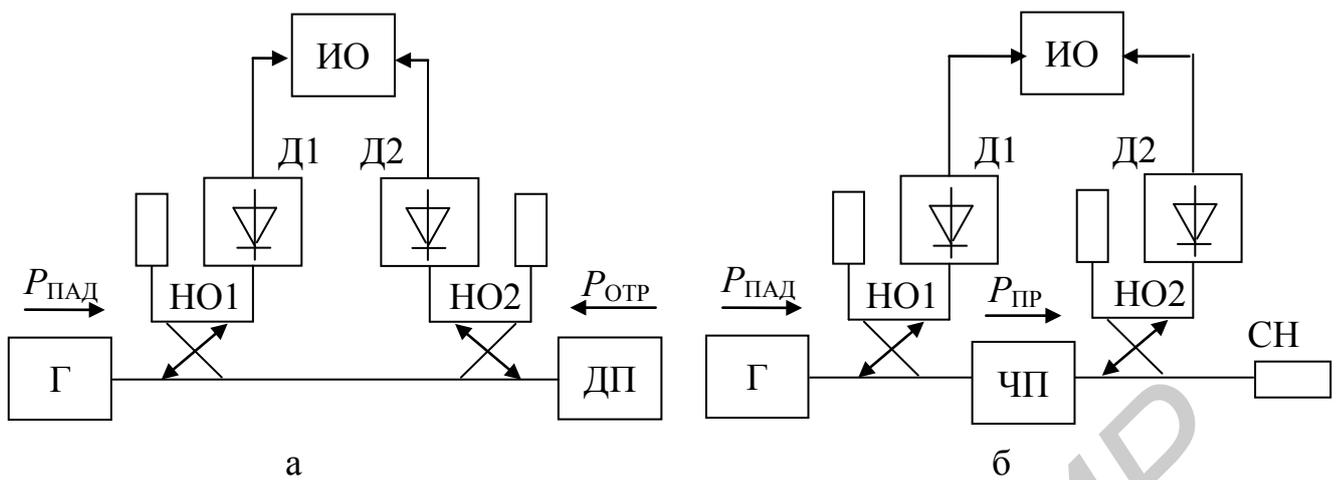
На практике наибольшее распространение получили приборы вида Р2, принцип работы которых основан на выделении падающей и отраженной волн от объекта измерения (двухполюсников – ДП и четырехполюсников – ЧП), а также прошедшей через объект измерения (ЧП). В них измеряется отношение сигналов, пропорциональных напряжению (мощности) этих волн. Так как при измерении КСВН выделяются падающая и отраженная волны, то измерители КСВН получили название рефлектометров.

На рисунке 5.3 показаны схемы рефлектометров для случаев измерения КСВН (а) и ослабления (б).

Падающая и отраженная (прошедшая) волны выделяются с помощью направленных ответвителей НО1 и НО2. Функции индикатора выполняют измерители отношения (ИО).

Как видно из рисунка 5.3, а, напряжения на выходах детекторов Д1 и Д2 (при их квадратичных характеристиках) будут пропорциональны $P_{ПД}$ и $P_{ОТР}$. Тогда в соответствии с (5.4) получим

$$|\dot{\Gamma}| = \sqrt{\frac{U_{ОТР}}{U_{ПД}}}. \quad (5.7)$$



а – измерение КСВН; б – ослабления
Рисунок 5.3 – Схемы рефлектометров

Простое изменение измерительного тракта рефлектометра превращает его в измеритель ослабления ЧП. Как видно из рисунка 5.3, б, НО2 включается на выходе ЧП, выделяя таким образом волну, прошедшую через ЧП ($P_{\text{ПР}}$). Тракт при этом нагружается на согласованную нагрузку (СН). Тогда в соответствии с (5.6) выходные напряжения Д1 и Д2 позволяют рассчитать ослабление:

$$A = 20 \lg \frac{U_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПАД}}} \quad (5.8)$$

Возможность выделения в рефлектометре сигналов, несущих информацию об уровнях мощности каждой из волн, существующих в измерительном тракте, а также использование генераторов качающейся частоты (ГКЧ) и ИО позволяет автоматизировать процесс измерения и обеспечить работу прибора в панорамном режиме. Таким образом, все приборы вида Р2 являются панорамными измерителями КСВН и ослабления (ПИКО).

Для ПИКО характерно применение унифицированного индикатора КСВН и ослабления, работающего на модулирующей частоте генератора качающейся частоты (ГКЧ), значение которой равно 100 кГц. Упрощенная структурная схема ПИКО показана на рисунке 5.4.

ГКЧ ПИКО включает в себя блок частотных меток, выходной сигнал которого после преобразований в индикаторном блоке воспроизводится на изображении исследуемой характеристики в виде подвижной частотной метки. В ГКЧ входит генератор развертки, напряжение которого и импульс подсвета также подаются в индикаторный блок, ГКЧ имеет систему автоматической регулировки мощности (АРМ). Она работает по сигналу, пропорциональному $P_{\text{ПАД}}$ и подаваемому в ГКЧ из индикаторного блока.

Индикатор КСВН и ослабления обеспечивает усиление сигналов, пропорциональных $P_{\text{ПАД}}$ и $P_{\text{ОТР}}$ (или $P_{\text{ПР}}$), деление их с помощью ИО, детектирование и панорамное воспроизведение на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) в линейном или логарифмическом масштабах с отсчетом значений измеряемых величин.

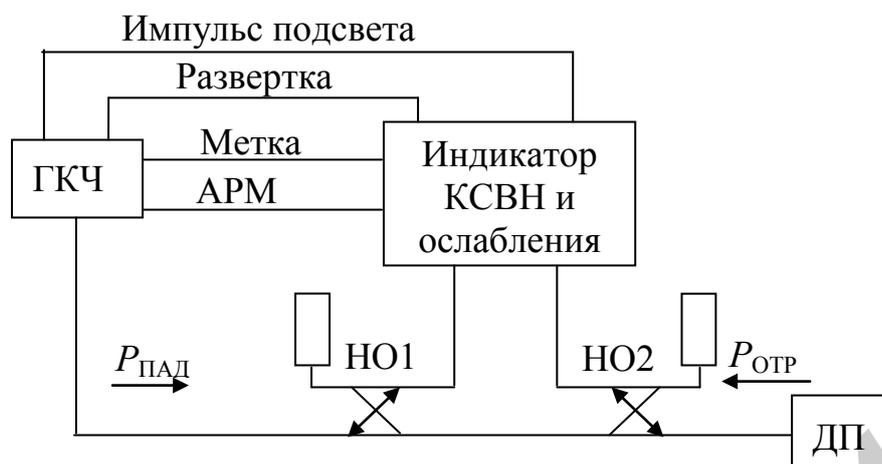


Рисунок 5.4 – Структурная схема ПИКО

Основными источниками погрешностей ПИКО являются неточность установки и нестабильность частоты ГКЧ, неравномерность частотных характеристик НО, неквадратичность характеристик детекторов, погрешности индикаторного блока. Подробно они рассмотрены в [1].

5.3 Приборы, используемые при выполнении работы

В ходе выполнения работы используются приборы и оборудование:

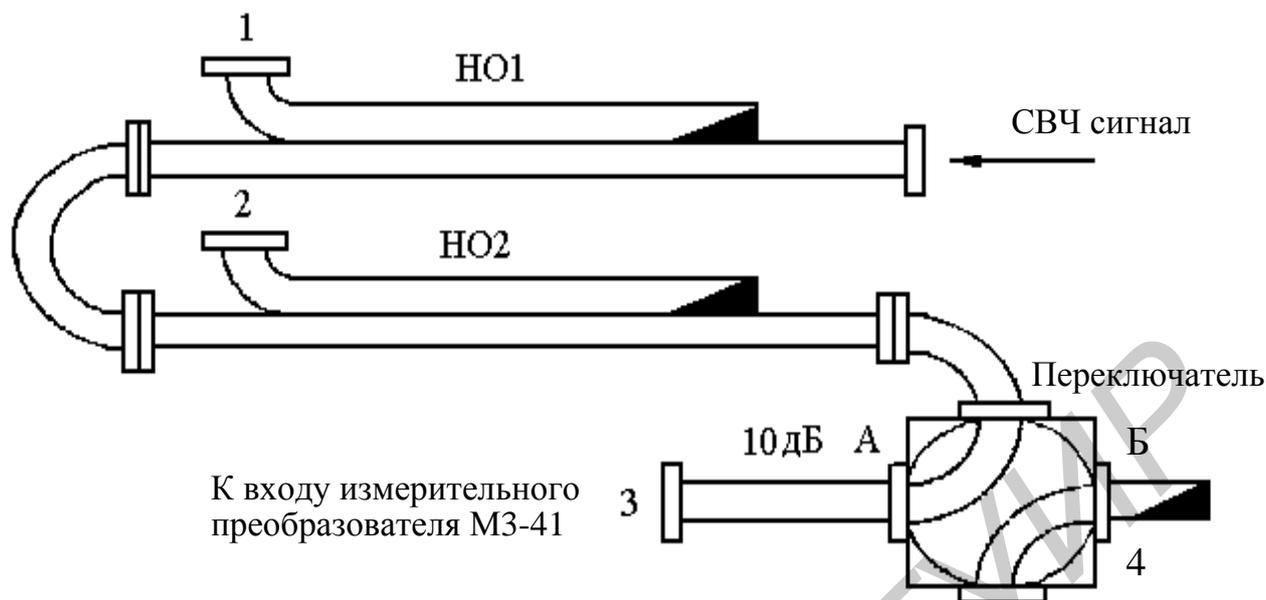
- ваттметр поглощаемой мощности МЗ-41 (приложение А);
- ваттметр поглощаемой мощности МЗ-51 (приложение Б);
- генератор сигналов высокочастотный Г4-109 (приложение В);
- измеритель КСВН панорамный Р2-61 (приложение Г);
- лабораторная установка;
- аттенюатор волноводный АФ-06;
- набор исследуемых нагрузок;
- согласованные и короткозамкнутые нагрузки.

5.4 Описание лабораторного макета

В качестве лабораторной установки при измерении мощности используется СВЧ измерительный тракт, собранный из стандартных волноводных СВЧ узлов сечением 23×10 мм.

СВЧ измерительный тракт, схематическое изображение которого приведено на рисунке 5.5, содержит два направленных ответвителя (НО), волноводный СВЧ переключатель, фиксированный аттенюатор на 10 дБ из комплекта ваттметра МЗ-41.

Как видно из рисунка 5.5, НО1 ориентирован на падающую, а НО2 – на отраженную от исследуемой нагрузки волну и соответственно они позволяют выделять падающую и отраженную от нагрузки мощности. С помощью СВЧ переключателя осуществляется подключение к выходу измерительного тракта СВЧ элементов и узлов, необходимых для проведения измерений в соответствии с порядком выполнения работы.



1–4 – выходы измерительного тракта
Рисунок 5.5 – СВЧ измерительный тракт

5.5 Подготовка к выполнению работы

5.5.1 По рекомендуемой литературе детально изучить методы измерения проходящей и поглощаемой мощности, а также параметров СВЧ цепей.

5.5.2 По приложениям к настоящему учебно-методическому пособию изучить устройство, принцип действия и работы приборов, применяемых при выполнении лабораторной работы, а также методики проведения измерений и оценки погрешностей полученных результатов.

5.5.3 Ответить на контрольные вопросы.

5.5.4 Сделать заготовку отчета (одну на бригаду) по лабораторной работе в соответствии с требованиями раздела «Содержание отчета» данного учебно-методического пособия.

5.5.5 Выполнить домашнее задание и включить его в заготовку отчета.

Определить мощность, проходящую в нагрузку, если известно, что измерения проводились с помощью ваттметра поглощаемой мощности по схеме, приведенной на рисунке 5.6. Показания ваттметра P_w , КСВН нагрузки и переходного ослабления направленного ответвителя C_{HO} приведены в таблице 5.1. Решение задачи привести в заготовке отчета.

Таблица 5.1

| Номер бригады | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------|------|------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| P_w , мкВт | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 16 | 18 | 11 | 13 | 15 | 21 |
| КСВН | 1,20 | 1,10 | 1,5 | 1,30 | 1,25 | 2,0 | 2,1 | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,4 | 1,12 |
| C_{HO} , дБ | 20 | 10 | 5 | 15 | 20 | 30 | 25 | 6 | 8 | 9 | 3 | 7 |

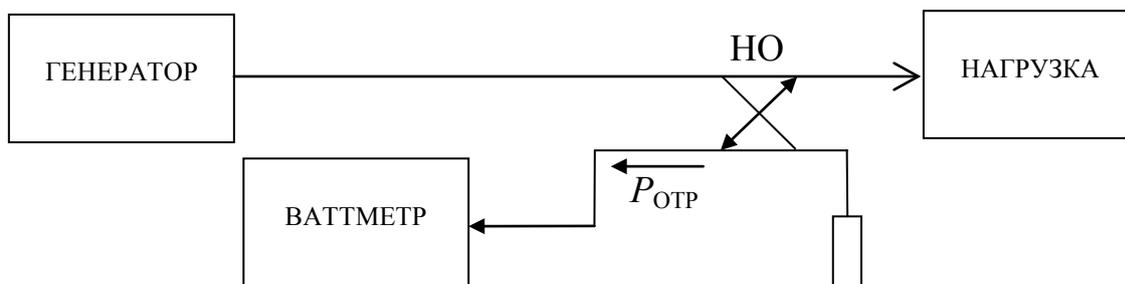


Рисунок 5.6 – Схема измерения проходящей в нагрузку мощности

5.6 Задания к лабораторной работе

5.6.1 Ваттметром поглощаемой мощности МЗ-41 измерить выходную калиброванную и максимальную некалиброванную мощности генератора Г4-109.

5.6.2 Измерить переходное ослабление НО1 и НО2 с помощью ваттметра МЗ-41.

5.6.3 Измерить проходящую в реальную нагрузку мощность от генератора Г4-109 с помощью НО1, НО2 и ваттметра поглощаемой мощности МЗ-41.

5.6.4 Измерить прибором Р2-61 КСВН реальных нагрузок на отдельных частотных точках и провести наблюдение и анализ частотных характеристик этих нагрузок.

5.6.5 Измерить прибором Р2-61 ослабление аттенюатора АФ-06 на отдельных частотных точках и провести наблюдение и анализ частотной характеристики ослабления этого аттенюатора.

5.7 Порядок выполнения работы

5.7.1 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 5.6.1 задания к лабораторной работе.

5.7.1.1 Подключить к выходу 4 (см. рисунок 5.5) СВЧ переключателя коаксиально-волноводный переход 5.433.022 измерительного преобразователя ваттметра МЗ-51, к выходу 3 – приемный преобразователь ваттметра МЗ-41, а к выходам 1 и 2 НО1 и НО2 – согласованные нагрузки. СВЧ переключатель поставить в положение «Б».

5.7.1.2 Подготовить к работе приборы МЗ-51 и Г4-109 согласно разделам Б.4 и В.4 приложений Б и В.

5.7.1.3 Руководствуясь методикой подраздела В.5.2 приложения В, настроить генератор Г4-109 на частоту $f_k = 10$ ГГц и установить на его выходе калиброванную мощность в соответствии с подразделом В.5.3 приложения В.

5.7.1.4 Руководствуясь методикой раздела Б.5 приложения Б, провести измерение ваттметром МЗ-51 калиброванной ($P_{х1}$) выходной мощности генератора Г4-109. Результат измерения занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

| Параметры | | | | | | | | | | |
|-----------|--------------|------------------------|-----------------------|------------|----------|------------------|------------------|-----|-------------------------|-----------------------|
| заданные | | | | измеренные | | вычисленные | | | | |
| f | K_{Σ} | $ \Gamma_{\text{ПР}} $ | $ \Gamma_{\text{Г}} $ | P_{X1} | P_{X2} | $P_{\text{КАЛ}}$ | P_{max} | A | δP_{max} | $\delta_{\text{РАС}}$ |
| ГГц | | | | | | | | дБ | % | % |
| 10,0 | 0,98 | 0,23 | 0,13 | | | | | | | 2,99 |

5.7.1.5 Установить на выходе генератора Г4-109 максимальную некалиброванную выходную мощность (значение ослабления плавного и ступенчатого аттенуаторов остается неизменным) и измерить P_{X2} аналогично пункту 5.7.1.4.

5.7.1.6 Повторить операции пунктов 5.7.1.3 – 5.7.1.5 на частоте генератора Г4-109, приведенной в таблице 5.3 (номер варианта соответствует номеру бригады).

Таблица 5.3

| Параметры | Номер варианта | | | | | | | | | | | |
|-----------|----------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| f , ГГц | 9,20 | 9,40 | 9,60 | 9,80 | 10,40 | 10,60 | 10,80 | 11,00 | 11,20 | 11,40 | 11,60 | 11,80 |

5.7.1.7 Рассчитать по результатам измерений P_{X1} и P_{X2} действительные значения калиброванной $P_{\text{КАЛ}}$ и максимальной некалиброванной P_{max} выходных мощностей генератора Г4-109. По техническим характеристикам Г4-109 и измеренным значениям калиброванной мощности рассчитать ослабление A измерительного тракта по формуле

$$A = 20 \lg \frac{P_{\text{КАЛ}}}{P_0} \quad (\text{дБ}),$$

где $P_{\text{КАЛ}}$ – измеренное значение калиброванной мощности;

P_0 – опорный уровень выходной калиброванной мощности Г4-109.

Для максимальной выходной мощности, пользуясь техническими характеристиками ваттметра МЗ-51, определить инструментальную относительную погрешность измерения (δP_{max} , %), а также погрешность рассогласования ($\delta_{\text{РАС}}$, %). Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 5.2.

5.7.2 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 5.6.2 задания к лабораторной работе.

5.7.2.1 Подготовить к работе согласно разделу А.4 приложения А ваттметр МЗ-41 в режиме измерения непрерывной мощности и генератор Г4-109.

5.7.2.2 Подключить к выходу 3 (см. рисунок 5.1) измерительного тракта (первичный канал общий для обоих НО) приемный преобразователь ваттметра МЗ-41, а к выходам 1 и 2 (вторичные каналы НО) – согласованные нагрузки (СН). СВЧ переключатель установить в положение «А».

5.7.2.3 Настроить генератор Г4-109 на частоту, заданную в таблице 5.4, в режиме НГ. Согласно разделу А.5 приложения А откалибровать ваттметр МЗ-41.

5.7.2.4 Установить максимальную выходную мощность генератора Г4-109 и, регулируя ослабление плавного аттенуатора генератора, установить на ватт-

метре МЗ-41 значение мощности первичного канала (P_{X3}) в пределах 200–400 мкВт. Значение P_{X3} занести в таблицу 5.5.

5.7.2.5 Переключить приемный преобразователь ваттметра МЗ-41 на выход 1, а СН – на выход 3. Измерить мощность (P_{X1}) во вторичном канале НО1.

Таблица 5.4

| Параметры | Номер варианта | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| f , ГГц | 8,5 | 8,8 | 9,1 | 9,4 | 9,7 | 10,3 | 10,6 | 10,9 | 11,2 | 11,5 | 11,8 | 12,1 |
| Номера исследуемых нагрузок | СН | СН | СН | СН | СН | СН | СН | СН | СН | СН | СН | СН |
| | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ | КЗ |
| | 8 | 2 | 4 | 10 | 3 | 12 | 5 | 4 | 6 | 7 | 2 | 4 |
| | 1 | 10 | 7 | 6 | 11 | 3 | 9 | 11 | 3 | 9 | 6 | 12 |

Таблица 5.5

| Параметры | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|-------|------------|----------|----------|-------------|-----------|-----------|-------|-------|--------|--------|-------------|--------------|
| заданные | | | измеренные | | | вычисленные | | | | | | | | |
| f | K_1 | K_2 | P_{X1} | P_{X2} | P_{X3} | $P_{ПК}$ | $P_{ВК1}$ | $P_{ВК2}$ | C_1 | C_2 | C_1' | C_2' | $\Delta C'$ | δC_1 |
| ГГц | – | – | мкВт | мкВт | мкВт | мкВт | мкВт | мкВт | – | – | дБ | дБ | дБ | % |
| | | | | | | | | | | | | | | |

5.7.2.6 Переключить приемный преобразователь ваттметра МЗ-41 на выход 2, а СН – на выход 1, подключить к выходу 4 короткозамыкающую заглушку, СВЧ переключатель установить в положение «Б». Измерить мощность P_{X2} во вторичном канале НО2.

5.7.2.7 Определить мощности на выходах первичного ($P_{ПК}$) и вторичных ($P_{ВК1}$ и $P_{ВК2}$) каналов НО1 и НО2 согласно подразделу А.5.3 приложения А.

По формуле (5.3) определить переходные ослабления НО1 и НО2 в разгах (C_1 и C_2) и децибелах (C_1' и C_2'). Используя технические характеристики ваттметра МЗ-41, определить погрешности ($\Delta C_1'$, дБ и δC_1 , %) результата косвенного измерения переходного ослабления.

Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 5.5.

5.7.3 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 5.6.3 задания к лабораторной работе.

5.7.3.1 Подключить к выходу 1 измерительного тракта преобразователь ваттметра МЗ-41, к выходу 2 – СН, к выходу 4 в качестве реальной нагрузки – СН. СВЧ переключатель остается в положении «Б».

5.7.3.2 Измерить мощность P_{X1} на выходе вторичного канала НО1 и результат измерения занести в таблицу 5.6.

5.7.3.3 Поменять местами преобразователь ваттметра МЗ-41 и СН на выходах 1 и 2 и измерить мощность P_{X2} на выходе вторичного канала НО2.

5.7.3.4 Рассчитать по результатам измерений действительные значения

мощностей P_1 и P_2 и, пользуясь данными таблицы 5.5, определить значения $P_{\text{ПАД}}$ и $P_{\text{ОТР}}$. По формуле 5.1 рассчитать искомое значение $P_{\text{ПР}}$. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 5.6.

5.7.3.5 Подключая в качестве реальной выходной нагрузки к выходу 4 нагрузки, указанные в таблице 5.4, повторить измерения и расчеты по подпунктам 5.7.3.2–5.7.3.4. Пронумерованные нагрузки выполнены в виде волноводных диафрагм и должны подключаться на выход тракта вместе с СН.

Таблица 5.6

| Параметры | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|-----|-------|------------|----------|-------------|-------|-------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------|------------|
| заданные | | | измеренные | | вычисленные | | | | | | | | |
| Нагрузка | f | K_1 | K_2 | P_{X1} | P_{X2} | P_1 | P_2 | $P_{\text{ПАД}}$ | $P_{\text{ОТР}}$ | $P_{\text{ПР}}$ | $K_{\text{СТУ}}$ | Δ_P | δ_P |
| № | ГГц | – | – | мкВт | мкВт | мкВт | мкВт | мкВт | мкВт | мкВт | – | мкВт | % |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |

5.7.3.6 Используя формулы (5.1), (5.5) и полученные результаты таблицы 5.6, рассчитать значения КСВН нагрузок.

Используя технические характеристики приборов и полученные результаты, оценить абсолютную (Δ_P) и относительную (δ_P) погрешности измерения $P_{\text{ПР}}$.

5.7.4 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 5.6.4 задания к лабораторной работе.

5.7.4.1 Подготовить к работе прибор Р2-61 согласно разделу Г.4 приложения Г.

5.7.4.2 Собрать схему измерения КСВН в соответствии с рисунком Г.5 приложения Г. К выходу НО «Отраженная» подключить в качестве объекта измерения одну из пронумерованных нагрузок, указанных в таблице 5.4. Эти нагрузки выполнены в виде диафрагм и должны подключаться к НО вместе с СН.

5.7.4.3 Руководствуясь методикой подраздела Г.5.1 приложения, Г получить изображение частотной характеристики КСВН исследуемой нагрузки и измерить значение $K_{\text{СТУ}}$ в заданных частотных точках ($f_{\text{ИЗМ}}$) характеристики, указанных в таблице 5.4. Построить в таблице 5.7 в масштабе изображение полученной характеристики.

5.7.4.4 Повторить измерения по подпункту 5.7.4.3 для другой, указанной в таблице 5.4 нагрузки.

5.7.4.5 Пользуясь техническими характеристиками прибора Р2-61, оценить инструментальные погрешности измерения $K_{\text{СТУ}}$ ($\delta_{K_{\text{СТУ}}}$). Результаты измерений и расчетов погрешностей занести в таблицу 5.7.

Провести сравнительный анализ результатов измерения $K_{\text{СТУ}}$ (таблица 5.7) и расчетов (таблица 5.6). Результаты анализа привести в отчете.

Таблица 5.7

| Параметры | | | | |
|-----------|-----|---|-----------|--------------------|
| заданные | | измеренные | | вычисленные |
| Нагрузка | f | Характеристика $K_{CTU} = F(f)$ | K_{CTU} | $\delta_{K_{CTU}}$ |
| № | ГГц | — | — | % |
| | |  | | |
| | |  | | |

Таблица 5.8

| Параметры | | | | |
|------------------|-----|--|-----|-------------|
| заданные | | измеренные | | вычисленные |
| Объект измерения | f | Характеристика $A = F(f)$ | A | Δ_A |
| — | ГГц | — | дБ | дБ |
| АФ-06 | |  | | |

5.7.5 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 5.6.5 задания к лабораторной работе.

5.7.5.1 Собрать схему измерения ослабления в соответствии с рисунком Г.3 приложения Г. Измеряемый объект (аттенюатор АФ-06) включить между НО «Падающая» и НО «Отраженная». К выходу тракта подключить СН.

5.7.5.2 Руководствуясь методикой подраздела Г.5.2 приложения Г, получить изображение частотной характеристики ослабления аттенюатора и измерить значения ослабления A в заданных частотных точках ($f_{\text{ИЗМ}}$) характеристики, указанных в таблице 5.4. Построить в таблице 5.8 в масштабе изображение полученной характеристики.

5.7.5.3 Пользуясь техническими характеристиками прибора Р2-61, оценить инструментальную погрешность измерения ослабления (Δ_A). Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 5.8.

5.7.5.4 Согласовать с преподавателем результаты измерений и выключить приборы.

5.7.6 Приступить к оформлению отчета.

5.8 Контрольные вопросы

- 1 Какие методы используются для измерения мощности СВЧ сигналов?
- 2 Как классифицируются приборы для измерения мощности?
- 3 В чем сущность метода измерения мощности с использованием эффекта «горячих» носителей тока?
- 4 В чем сущность термоэлектрического метода измерения мощности?
- 5 Какие методы применяются при измерении проходящей мощности?
- 6 Какие методы применяются при измерении поглощаемой мощности?
- 7 Каковы источники погрешностей при измерении проходящей мощности?
- 8 Каковы источники погрешностей при измерении поглощаемой мощности?
- 9 Как измерить переходное ослабление направленного ответвителя?
- 10 На чем основан принцип действия ваттметра МЗ-41?
- 11 На чем основан принцип действия ваттметра МЗ-51?
- 12 Как измерить проходящую в нагрузку мощность, используя ваттметры поглощаемой мощности? Как в этом случае определяется проходящая мощность?
- 13 Какие основные требования предъявляются к приемным преобразователям ваттметров поглощаемой мощности?
- 14 Какие методы используются при измерении параметров СВЧ цепей?
- 15 Как классифицируются приборы для измерения параметров СВЧ цепей?
- 16 Какой метод измерения положен в основу работы прибора Р2-61? В чем сущность этого метода?
- 17 Каковы основные источники погрешностей панорамных измерителей КСВН и ослаблений?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА МИ–6 ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ И ГРУППОВОГО ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ

6.1 Цель работы

6.1.1 Изучение методов измерения фазовых сдвигов (метод суммы и разности напряжений, нулевой метод и метод преобразования фазового сдвига во временной интервал).

6.1.2 Изучение методов измерения группового времени запаздывания.

6.1.3 Изучение устройства и принципа действия измерительных приборов Ф2-34 и ГЗ-109 и приобретение практических навыков работы с ними.

6.2 Краткие теоретические сведения

К числу основных параметров электромагнитных колебаний, определяющих состояние колебательного процесса в заданный момент времени, относится фаза исследуемого сигнала. Для гармонического колебания $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ фаза Φ определяется аргументом синусоидальной функции, линейно зависящей от времени, т. е. $\Phi = \omega t + \varphi$, где φ – начальная фаза. Если начальные фазы двух синусоидальных колебаний с частотой ω обозначить соответственно через φ_1 и φ_2 , то фазовый сдвиг будет равен разности начальных фаз ($\varphi_1 - \varphi_2$). Следовательно, фазовый сдвиг является постоянной величиной и не зависит от времени отсчета.

Измерение фазовых сдвигов гармонических сигналов позволяет получить информацию о качестве радиоэлектронных устройств, линий связи, технологических процессов и т. д. Для проведения таких измерений используются измерительные приборы подгруппы Ф (Ф2 – измерители фазовых сдвигов; Ф3 – измерительные фазовращатели; Ф4 – измерители группового времени запаздывания).

Наибольшее распространение получили следующие методы измерения фазовых сдвигов: метод суммы и разности напряжений, нулевой метод, метод преобразования фазового сдвига во временной интервал.

6.2.1 Суть метода суммы и разности напряжений заключается в переносе информации об измеряемом фазовом сдвиге в амплитуду результирующего (суммарного или разностного) напряжения с последующим измерением этого напряжения аналоговым или цифровым вольтметром. Если два гармонических сигнала, описываемых выражениями

$$U_1(t) = U_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1); \quad (6.1)$$

$$U_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2), \quad (6.2)$$

подать на схему сложения (сумматор), то амплитуда их векторной суммы при $U_{m1} = U_{m2} = U_m$ будет равна

$$U_{mc} = 2U_m \cos \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}. \quad (6.3)$$

Аналогично с помощью схемы вычитания можно образовать разностное

напряжение, амплитуда которого равна

$$U_{mp} = 2U_m \sin \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}. \quad (6.4)$$

Для измерения фазового сдвига $\varphi_X = (\varphi_1 - \varphi_2)$ достаточно использовать только суммарную U_{mc} или разностную U_{mp} составляющие напряжения. Однако такой фазометр будет иметь пределы измерения от 0 до $+90^\circ$, неравномерную шкалу и резко выраженную зависимость погрешности измерения фазовых сдвигов от значения φ_X . Кроме того, измеренное значение φ_X будет зависеть от значения напряжения U_m . Поэтому в практических схемах фазометров, реализующих метод суммы и разности напряжений, используется как суммарное, так и разностное напряжение.

Структурная схема одного из возможных вариантов такого фазометра приведена на рисунке 6.1.

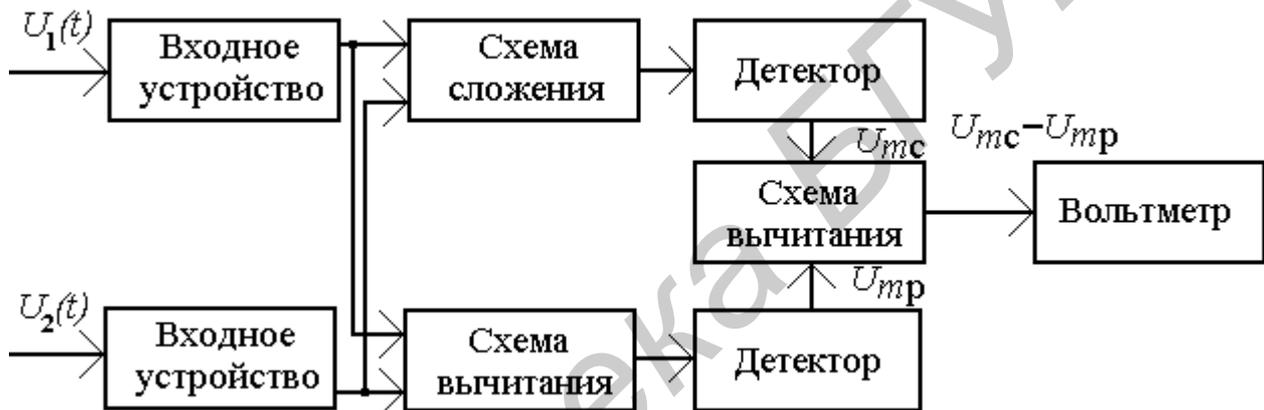


Рисунок 6.1 – Структурная схема фазометра, реализующего метод суммы и разности напряжений

Входные сигналы U_1 и U_2 , амплитуды которых уравниваются с помощью входных устройств, подаются на схемы сложения и вычитания. На выходах этих схем образуются суммарное (6.3) и разностное (6.4) постоянные напряжения, которые поступают на вторую схему вычитания. На ее выходе будет выделяться разностное напряжение, которое измеряется аналоговым или цифровым вольтметром.

Зависимость $\frac{U_{mc} - U_{mp}}{2U_m}$ от φ_X (рисунок 6.2) оказывается практически равномерной, что позволяет при предварительной калибровке фазометра для устранения зависимости φ_X от U_m расширить пределы измерения до $\pm 180^\circ$. Следует отметить, что при измерении фазовых сдвигов фазометром, реализующим данный метод, наблюдается неоднозначность отсчета (кроме точек $+1$ и -1) значений измеренного фазового сдвига. Действительно, одному и тому же значению разностного напряжения $\frac{U_{mc} - U_{mp}}{2U_m}$ соответствуют два значения измеренного

фазового сдвига φ_X и φ_X' (см. рисунок 6.2). Действительное значение фазового сдвига можно определить путем дополнительного измерения, при котором напряжение U_2 сдвигается по фазе с помощью дополнительного фазовращателя на небольшой фиксированный угол φ_0 .

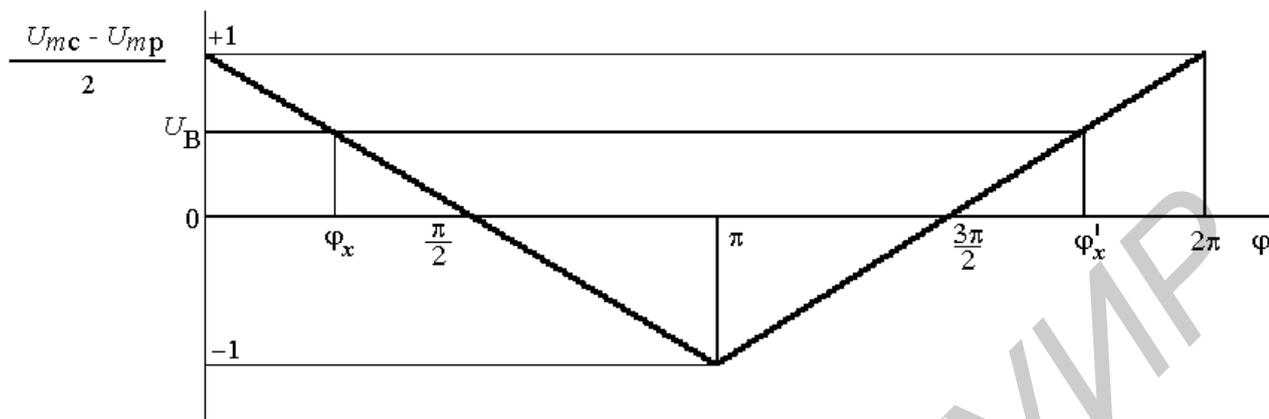


Рисунок 6.2 – Зависимость выходного напряжения фазометра от фазового сдвига

Как видно из рисунка 6.2, если показанию вольтметра U_B без включения дополнительного фазовращателя соответствуют два значения фазового сдвига φ_X и φ_X' , то после внесения дополнительного фазового сдвига φ_0 показания вольтметра для фазовых сдвигов $\varphi_1 = \varphi_X + \varphi_0$ и $\varphi_2 = \varphi_X' + \varphi_0$ будут различны. Действительно, при $U_B > U_B'$ значение измеряемого фазового сдвига будет находиться в пределах $0 < \varphi_X < \pi$, при $U_B < U_B'$ – в пределах $\pi < \varphi_X < 2\pi$. Таким образом, дополнительно измерив значение U_B' , легко определить значение измеряемого фазового сдвига φ_X .

Метод суммы и разности напряжений используется для разработки фазометров, работающих в широком диапазоне частот (до сотен гигагерц), и обеспечивает измерения фазовых сдвигов с основной погрешностью, не превышающей $\pm(2-3)^\circ$. Данный метод используется также в приборах, предназначенных для контроля за постоянством фазового сдвига. При этом погрешность измерения уменьшается до десятых долей градуса.

Более подробно данный метод рассмотрен в [1–4].

6.2.2 Типовая структурная схема фазометра, реализующего **нулевой метод** измерения фазовых сдвигов, приведена на рисунке 6.3.

Входные сигналы U_1 (6.1) и U_2 (6.2) с помощью входных устройств выравниваются по амплитуде и поступают на измерительный (ИФВ) и установочный (УФВ) фазовращатели. В качестве индикаторного устройства могут использоваться индикаторы равенства напряжений U_1' и U_2' , их противофазности или квадратурности.

Перед началом измерений производится калибровка фазометра с целью устранения собственного фазового сдвига, вносимого элементами схемы. Для этого указатель шкалы ИФВ устанавливают на нулевую отметку и на оба входа

фазометра подают один из исследуемых сигналов. Изменением фазового сдвига, вносимого УФВ, добиваются нулевых показаний индикаторного устройства, компенсируя тем самым собственный фазовый сдвиг фазометра.

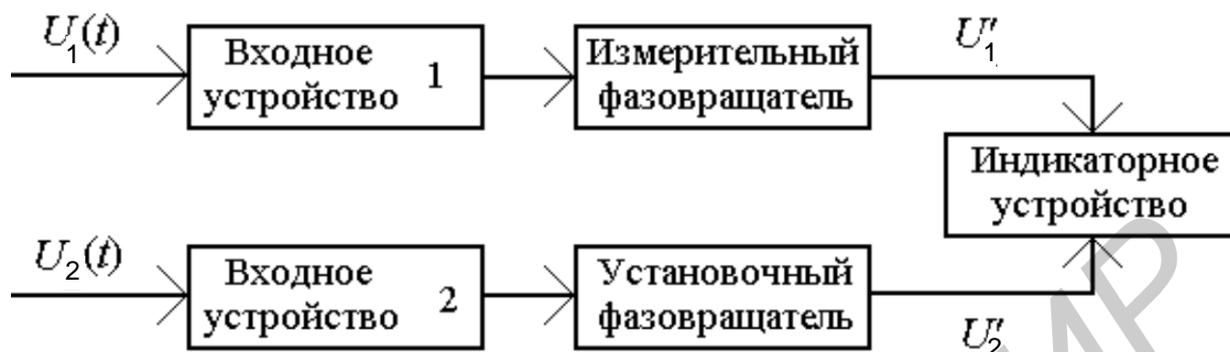


Рисунок 6.3 – Структурная схема фазометра, реализующего нулевой метод измерения фазовых сдвигов

В режиме измерения на оба входа подают два исследуемых сигнала U_1 и U_2 . Изменением фазового сдвига, вносимого ИФВ, также добиваются нулевых показаний индикаторного устройства, компенсируя тем самым фазовый сдвиг между U_1 и U_2 . Измеренное значение фазового сдвига отсчитывается непосредственно по шкале ИФВ.

В качестве индикатора синфазности ($\varphi = 0^\circ$) или противофазности ($\varphi = 180^\circ$) сигналов чаще всего используется электронно-лучевой осциллограф. При подаче напряжений U_1' и U_2' на входы X и Y электронно-лучевого осциллографа наблюдаемая на экране ЭЛТ интерференционная фигура будет иметь вид эллипса, параметры которого определяются значением измеряемого фазового сдвига φ_X . При синфазности напряжений, поступающих на входы X и Y осциллографа, эллипс «стягивается» в линию, которая наклонена вправо под углом 45° (при $U_1' = U_2'$). Если же $\varphi = 180^\circ$, линия будет наклонена влево также под углом 45° . Момент «стягивания» эллипса в линию может быть зафиксирован достаточно точно. Погрешность измерения фазового сдвига фазометром, реализующим нулевой метод, определяется в основном погрешностью градуировки шкалы ИФВ. Более подробно нулевой метод измерения φ_X изложен в [1–4].

6.2.3 Измерение фазового сдвига методом преобразования во временной интервал основано на алгоритме, описываемом выражением

$$\varphi = 360^\circ \frac{\Delta t_X}{T_X}, \quad (6.5)$$

где T_X – период сигнала;

Δt_X – интервал времени, пропорциональный измеряемому фазовому сдвигу.

Структурная схема фазометра, реализующего метод преобразования фазового сдвига во временной интервал, приведена на рисунке 6.4, временные диаграммы, поясняющие принцип его работы, представлены на рисунке 6.5.

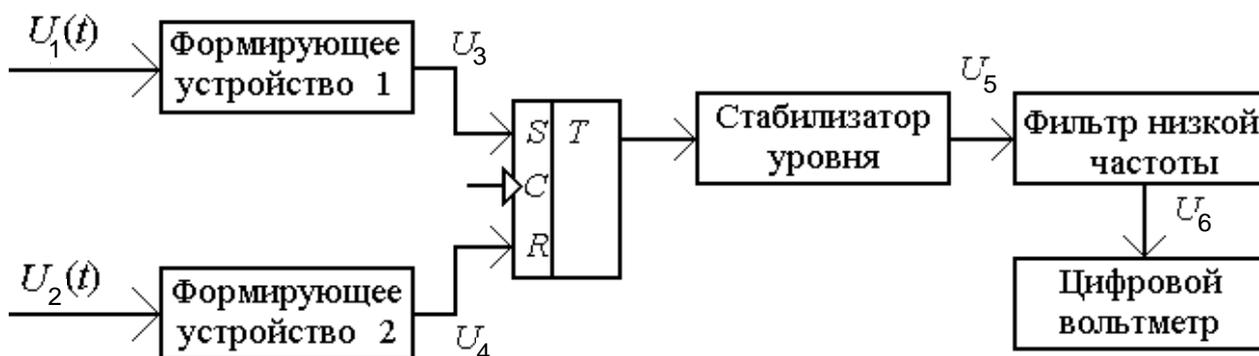


Рисунок 6.4 – Структурная схема фазометра, реализующего метод преобразования фазовых сдвигов во временной интервал

Гармонические сигналы U_1 и U_2 преобразуются с помощью формирующих устройств в последовательность коротких импульсов U_3 и U_4 (см. рисунок 6.5), временное положение которых соответствует нуль-переходам входных сигналов из отрицательной области в положительную. Интервал времени Δt_x между ближайшими импульсами последовательностей U_3 и U_4 будет пропорционален измеряемому фазовому сдвигу φ_x .

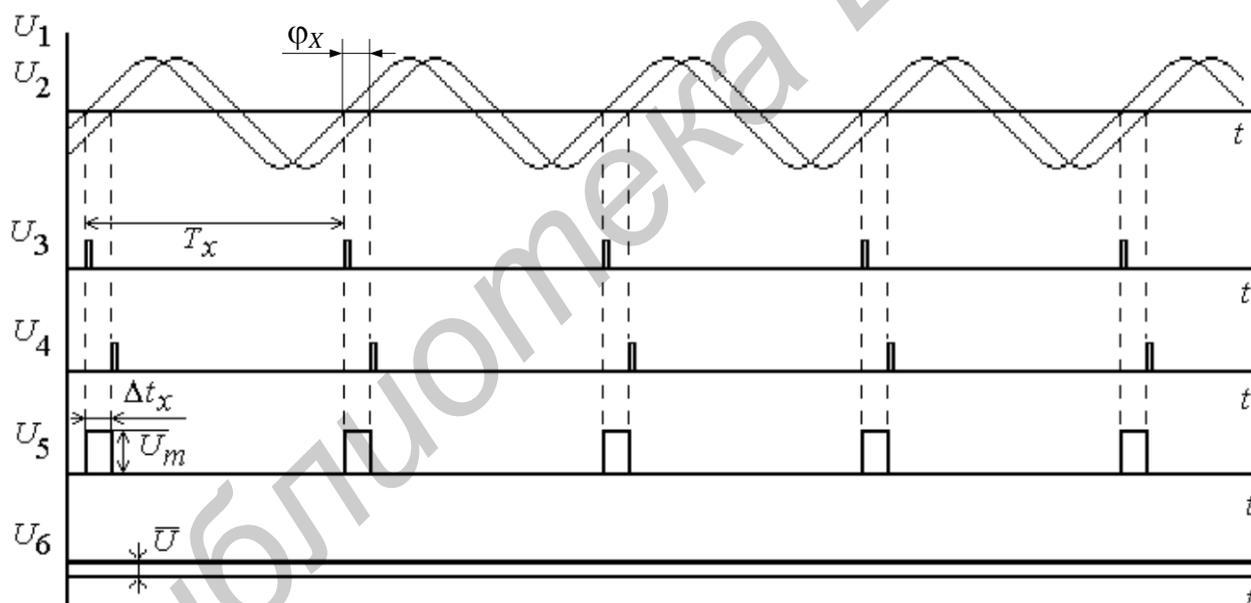


Рисунок 6.5 – Временные диаграммы работы фазометра с преобразованием фазового сдвига во временной интервал

Как видно из выражения (6.5), для измерения фазового сдвига φ_x рассматриваемым методом необходимо определить отношение $\Delta t_x / T_x$. Это отношение наиболее просто определяется как постоянная составляющая \bar{U} (U_6) периодической последовательности прямоугольных импульсов (U_5) (см. рисунок 6.5) в соответствии с выражением

$$\bar{U} = U_m \frac{\Delta t_x}{T_x}. \quad (6.6)$$

Определив из выражения (6.6) отношение $\Delta t_x/T_x$ и подставив его в выражение (6.5), получим

$$\varphi_x = 360^\circ \frac{\bar{U}}{U_m}. \quad (6.7)$$

Зафиксировав с помощью стабилизатора уровня амплитуду прямоугольных импульсов U_m на уровне 360 мВ и выделив с помощью фильтра низкой частоты постоянную составляющую \bar{U} , получим, что измеренное среднее значение напряжения (в милливольтках) будет равно измеряемому фазовому сдвигу в градусах.

Рассмотренный цифровой фазометр, реализующий метод преобразования фазового сдвига во временной интервал, работает по алгоритму преобразования: фазовый сдвиг \rightarrow интервал времени \rightarrow напряжение \rightarrow цифровой код. В настоящее время широко применяются цифровые фазометры, реализующие алгоритм преобразования: фазовый сдвиг \rightarrow интервал времени \rightarrow цифровой код. Преимущества такого преобразования очевидны: упрощается алгоритм работы фазометра и повышается точность измерения фазовых сдвигов.

Этот метод положен в основу работы фазометра Ф2-34, который используется при выполнении данной лабораторной работы. Описание принципа его действия подробно изложено в приложении Д.

Более подробно методы измерения фазовых сдвигов рассмотрены в [1–4].

6.2.4 Помимо измерения фазовых сдвигов в радиоизмерительной технике большое внимание уделяется **измерению группового времени запаздывания (ГВЗ)**, которое количественно характеризует фазовые искажения при передаче сигналов в различных радиотехнических устройствах. Различают абсолютное и относительное групповое время запаздывания.

Абсолютное ГВЗ определяется не только характером фазочастотной характеристики (ФЧХ), но и электрической длиной тракта передачи исследуемого сигнала. Под абсолютным ГВЗ понимается величина

$$t_{\text{ГР АБС}} = \frac{d\varphi}{d\omega}, \quad (6.8)$$

где φ – абсолютный фазовый сдвиг, на который изменится фаза синусоидального сигнала при распространении его по измеряемой цепи за время $t_{\text{РАС}}$ ($\varphi = \omega t_{\text{РАС}}$).

Однако саму нелинейность ФЧХ удобнее оценивать с помощью относительного ГВЗ, которое определяется выражением

$$t_{\text{ГР}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\omega} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\omega_2 - \omega_1}, \quad (6.9)$$

где φ_1 – фазовый сдвиг на некоторой опорной частоте ω_1 , принятой за начало отсчета;

φ_2 – фазовый сдвиг на данной частоте ω_2 .

Из (6.9) следует, что при линейной ФЧХ значение ГВЗ является постоянным ($t_{ГР} = \text{const}$), а неравномерность характеристики $t_{ГР}(\omega)$ – мерой нелинейности ФЧХ и однозначно характеризует фазовые искажения передаваемого сигнала.

В соответствии с выражением (6.9) методы измерения ГВЗ могут быть разделены на две группы: методы, основанные на определении крутизны ФЧХ по ее координатам (измерение ГВЗ «по точкам»), и модуляционные методы.

Методы измерения ГВЗ «по точкам» заключаются в реализации алгоритма (6.9) любым методом измерения фазовых сдвигов. Основными недостатками данных методов являются возможность измерения ГВЗ только устройств, имеющих линейную ФЧХ, а также низкая производительность измерений.

Модуляционные методы основаны на модуляции измерительного сигнала, подаваемого на вход исследуемого устройства, с последующим измерением фазового сдвига модулирующего напряжения. При этом в приборах для измерения ГВЗ может использоваться амплитудная, частотная или импульсная модуляция.

Метод амплитудной модуляции (метод Найквиста) является самым распространенным и позволяет получить наиболее простые технические решения при построении измерителей ГВЗ. Суть метода заключается в выделении огибающей амплитудно-модулированного сигнала, прошедшего через исследуемое устройство, и измерении ее фазового сдвига относительно входного модулирующего колебания. Более подробно методы и приборы для измерения ГВЗ рассмотрены в [1–3].

6.3 Приборы, используемые при выполнении работы

В ходе выполнения работы используются приборы:

- измеритель разности фаз Ф2-34 (приложение Д);
- генератор сигналов низкочастотный ГЗ-109 (приложение Е);
- осциллограф электронный С1-101;
- фазовращатель измерительный.

6.4 Описание лабораторного макета

Лабораторная установка представляет собой два макета. Внешний вид лицевой панели макета М1, предназначенного для измерения фазовых сдвигов методом суммы и разности напряжений и нулевым методом, приведен на рисунке 6.6.

Макет М1 содержит два измерителя фазовых сдвигов, реализующие метод суммы и разности напряжений и нулевой метод. Структурные схемы данных измерителей приведены на рисунках 6.1 и 6.3, в качестве исследуемых устройств используются линейные активные *RC*-фазовращатели и фазовращатели с нелинейными фазочастотными характеристиками.

В качестве индикаторного устройства в измерителе фазовых сдвигов, реализующем метод суммы и разности напряжений, применен магнитоэлектрический прибор М1690А с зеркальной шкалой.

В качестве индикаторного устройства в измерителе фазовых сдвигов, реализующем нулевой метод, использован универсальный одноканальный осцил-

логграф С1-101, конструктивно встроенный в лабораторный макет. Тумблер включения блока питания осциллографа выведен на переднюю панель макета. В осциллографе установлена необходимая яркость изображения и фокусировка луча. Включение макета осуществляется с помощью тумблера «СЕТЬ» путем перевода его в верхнее положение. Индикацией включения макета является освещение шкалы измерительного фазовращателя.

Изменение фазового сдвига, вносимого фазовращателями лабораторного макета, осуществляется с помощью переключателей «ВАРИАНТ».



Рисунок 6.6 – Внешний вид передней панели лабораторного макета M1

Второй макет (макет M2), внешний вид передней панели которого приведен на рисунке 6.7, предназначен для измерения фазовых сдвигов методом преобразования фазового сдвига во временной интервал и ГВЗ, вносимых исследуемыми устройствами. Макет M2 содержит исследуемый фазовращатель, фазовые сдвиги которого изменяются посредством переключения элементов фазовращателя с помощью переключателя «ВАРИАНТ».

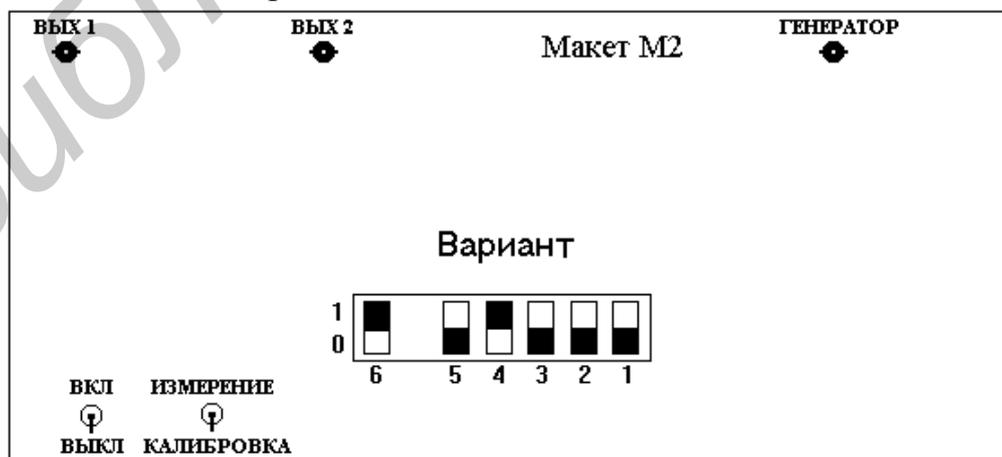


Рисунок 6.7 – Внешний вид передней панели лабораторного макета M2

6.5 Подготовка к выполнению работы

6.5.1 По рекомендуемой литературе детально изучить методы измерения фазовых сдвигов и группового времени запаздывания.

6.5.2 По приложениям Д и Е изучить устройство, принцип действия и порядок работы с приборами Ф2-34 и ГЗ-109, а также методики проведения с их помощью измерений и оценки погрешностей полученных результатов.

6.5.3 Ответить на контрольные вопросы.

6.5.4 Сделать заготовку отчета (одну на бригаду) по лабораторной работе в соответствии с разделом «Содержание отчета» данного учебно-методического пособия.

6.5.5 Выполнить домашнее задание и включить его в заготовку отчета.

Измерение фазового сдвига, вносимого исследуемым четырехполюсником, производилось с помощью цифрового фазометра, реализующего метод преобразования фазового сдвига во временной интервал. Определить значение фазового сдвига и оценить погрешность его измерения, если известно, что за время измерения $T_{и}$ двоично-десятичный счетчик зафиксировал количество счетных импульсов N . Известно также, что период повторения счетных импульсов, формируемых тактовым генератором, равен T_0 , а фазометр индицирует значение фазового сдвига до десятых долей градуса.

Значения величин T_0 , N и $T_{и}$ приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

| Номер бригады | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-------|------|-----|
| T_0 , мкс | 1 | 0,1 | 10 | 1 | 4 | 100 | 20 | 0,1 | 20 | 100 |
| N , шт. | 1000 | 500 | 300 | 200 | 500 | 600 | 700 | 20000 | 1000 | 800 |
| $T_{и}$, мс | 36 | 0,9 | 36 | 1,8 | 14,4 | 360 | 72 | 9 | 80 | 460 |

Привести структурную схему фазометра, реализующего данный метод измерения фазовых сдвигов.

6.6 Задания к лабораторной работе

6.6.1 Измерить фазовые сдвиги, вносимые фазовращателем лабораторного макета:

6.6.1.1 Методом суммы и разности напряжений.

6.6.1.2 Нулевым методом.

6.6.1.3 Методом преобразования фазового сдвига во временной интервал.

6.6.2 Измерить ГВЗ фазовращателей лабораторного макета.

6.7 Порядок выполнения работы

6.7.1 Выполнить измерения в соответствии с подпунктом 6.6.1.1 задания к лабораторной работе.

6.7.1.1 Подготовить к проведению измерений генератор ГЗ-109 согласно

разделу Е.4 приложения Е. Установить по шкалам генератора ГЗ-109 частоту выходного сигнала 28 кГц и напряжение выходного сигнала 5 В согласно разделу Е.5 приложения Е.

6.7.1.2 Соединить с помощью коаксиального кабеля выходной разъем «ВЫХОД 1» генератора ГЗ-109 с входом макета М1. Переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ – КАЛИБРОВКА» макета М1 установить в положение «КАЛИБРОВКА», тумблер «С1-101 – М1690А» – в положение «М1690А», переключатель «Ф Вкл – Ф Выкл» – в положение «Ф Выкл». Указатель отсчетной шкалы измерительного фазовращателя установить на нулевую отметку. Включить макет, переведя тумблер «ВКЛ – ВЫКЛ» в положение «ВКЛ».

6.7.1.3 Регулировкой ручки «ЧУВСТВ.» установить стрелку прибора М1690А на отметку шкалы «50».

6.7.1.4 Произвести градуировку шкалы прибора М1690А в значениях фазовых сдвигов. Для этого, вращая ручку измерительного фазовращателя, последовательно установить стрелку прибора М1690А на указанные в таблице 6.2 отметки α шкалы и отсчитать соответствующие им значения фазовых сдвигов φ по шкале ИФВ.

При этом необходимо сделать полный оборот шкалы ИФВ, последовательно фиксируя значения фазовых сдвигов от 0 до 180° и от 180 до 360°. Результаты измерений фазовых сдвигов занести в таблицу 6.2. Построить градуировочный график $\alpha = f(\varphi)$ фазометра, реализующего метод суммы и разности напряжений, привести его в отчете по лабораторной работе.

Таблица 6.2

| Отметки α шкалы прибора М1690А, дел. | 50 | 45 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 | min |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|-----|
| Показания ИФВ от 0 до 180° | | | | | | | | | | | |
| Показания ИФВ от 180 до 360° | | | | | | | | | | | |

6.7.1.5 Переключатель «ИЗМЕРЕНИЕ – КАЛИБРОВКА» установить в положение «ИЗМЕРЕНИЕ». Переключатели «ВАРИАНТ» установить в положения, соответствующие номеру точки 1 и согласно с номером бригады (таблица 6.3), и произвести отсчет показаний прибора М1690А в делениях α шкалы. Результат измерения занести в таблицу 6.4 (точка 1).

Переключатель «Ф Вкл – Ф Выкл» перевести в положение «Ф Вкл». Зафиксировать изменение показаний прибора М1690А, добавив знак «+» к измеренному значению при увеличении показаний прибора или знак «-» – при уменьшении показаний. Переключатель «Ф Вкл – Ф Выкл» вернуть в положение «Ф Выкл».

6.7.1.6 Повторить операции подпункта 6.7.1.5 для остальных точек, указанных в таблице 6.3. Результаты измерений занести в таблицу 6.4.

Таблица 6.3

| Номер бригады | Положение переключателей «ВАРИАНТ» | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|------------------------------------|---|---|---|---|---|---------------------|---|---|---|---|---|---------------------|---|---|---|---|---|---------------------|---|---|---|---|---|
| | Номер точки | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 1 | | | | | | 2 | | | | | | 3 | | | | | | 4 | | | | | |
| | Номер переключателя | | | | | | Номер переключателя | | | | | | Номер переключателя | | | | | | Номер переключателя | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | |
| 6 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | |

Таблица 6.4

| Номер под-пункта задания к лабораторной работе | Обозначение параметра | Измеренные и вычисленные параметры | | | |
|--|---|------------------------------------|---|---|---|
| | | Номера точек | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 6.6.1.1 | α , дел | | | | |
| | φ , град | | | | |
| | $\Delta\varphi$, град | | | | |
| 6.6.1.2 | φ_K , град | | | | |
| | φ , град | | | | |
| | $\Delta\varphi$, град | | | | |
| 6.6.1.3 | Измерение фазового сдвига фазометром Ф2-34 | | | | |
| | φ , град | | | | |
| | $\Delta\varphi$, град | | | | |
| | Измерение приращения фазового сдвига фазометром Ф2-34 | | | | |
| | φ_{ij} , град | | | | |
| | $\Delta\varphi_{ij}$, град | | | | |

6.7.1.7 Пользуясь полученным градуировочным графиком и методикой исключения неоднозначности отсчета фазовых сдвигов (пункт 6.2.1), определить значения измеренных фазовых сдвигов в градусах. По формуле (6.10) определить инструментальную погрешность измерения фазовых сдвигов. Результаты расчетов занести в таблицу 6.4.

$$\Delta\varphi = \pm(0,01\varphi_X + 0,02A_X + 1)^\circ, \quad (6.10)$$

где φ_X – измеренное значение фазового сдвига в градусах;

A_X – числовое значение амплитуды исследуемого сигнала.

6.7.2 Выполнить измерения в соответствии с подпунктом 6.6.1.2 задания к лабораторной работе.

6.7.2.1 Подготовить к работе осциллограф С1-101:

– переключатель «V/дел» установить в положение «0,5» (остальные органы управления могут находиться в произвольном положении);

– тумблер «С1-101 – М1690А» перевести в положение «С1-101», тумблер «ПИТАНИЕ» на передней панели осциллографа перевести в верхнее положение;

– после самопрогрева осциллографа на экране ЭЛТ появится изображение эллипса, регулировкой ручек «↑», «↓» и «←», «→» добиться, чтобы изображение эллипса находилось в центре экрана электронно-лучевой трубки.

6.7.2.2 Установить переключатель «КАЛИБРОВКА – ИЗМЕРЕНИЕ» в положение «КАЛИБРОВКА». Провести калибровку фазометра, реализующего нулевой метод измерения фазовых сдвигов. Для этого регулировкой фазового сдвига, вносимого ИФВ, «стянуть» изображение эллипса, полученного на экране осциллографа С1-101, в прямую линию, наклоненную под углом приблизительно 45° к горизонтали вправо. Зафиксировать показание измерительного фазовращателя φ_K с учетом знака и занести его в таблицу 6.4.

6.7.2.3 Перевести переключатель «КАЛИБРОВКА – ИЗМЕРЕНИЕ» в положение «ИЗМЕРЕНИЕ», а переключатели «ВАРИАНТ» установить в положения, соответствующие номеру бригады и номеру точки 1 (таблица 6.3).

6.7.2.4 Вращением ручки ИФВ «стянуть» изображение полученного на экране осциллографа эллипса в прямую линию, наклоненную под углом приблизительно 45° к горизонтали вправо. Зафиксировать показания фазовращателя φ_K и занести его в таблицу 6.4. Определить значение измеренного фазового сдвига как разность показаний ИФВ в режимах измерения и калибровки. Результаты измерений занести в таблицу 6.4 (точка 1).

Внимание! Необходимо учитывать знак отсчитываемого значения фазового сдвига. Если измеренное значение отсчитывается по правому участку шкалы ИФВ (от 0° до 180°), то оно будет иметь знак «+». Если же отсчет производится по левому участку шкалы ИФВ, то измеренное значение будет иметь знак «-».

6.7.2.5 Повторить операции подпунктов 6.7.2.3–6.7.2.4 для остальных точек, указанных в таблице 6.3. Результаты измерений занести в таблицу 6.4.

6.7.2.6 Оценить инструментальную погрешность измерения фазовых сдвигов нулевым методом и занести ее в таблицу 6.4.

6.7.3 Выполнить измерения в соответствии с подпунктом 6.6.1.3 задания к лабораторной работе.

6.7.3.1 Установить переключатель «КАЛИБРОВКА – ИЗМЕРЕНИЕ» макета М2 в положение «КАЛИБРОВКА». Подготовить фазометр Ф2-34 к проведению измерений абсолютных фазовых сдвигов согласно разделу Д.4 приложения Д.

6.7.3.2 Установить переключатель «КАЛИБРОВКА – ИЗМЕРЕНИЕ» в положение «ИЗМЕРЕНИЕ». Переключатели «ВАРИАНТ» макета М2 установить в положения, соответствующие номеру бригады и точки 1 (таблица 6.3) и, руководствуясь методикой раздела Д.5 приложения Д, провести измерение фазового сдвига, вносимого исследуемым четырехполюсником. Результат измерения занесите в таблицу 6.4 (точка 1).

6.7.3.3 Повторить операции подпункта 6.7.3.2 для остальных номеров точек, указанных в таблице 6.3. Результаты измерений занесите в таблицу 6.4.

6.7.3.4 Пользуясь техническими характеристиками фазометра Ф2-34, определите погрешность измерения фазовых сдвигов и занесите ее в таблицу 6.4.

6.7.3.5 Перевести переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие номеру точки 1. Нажать кнопку « $\Delta\varphi$ » на передней панели фазометра Ф2-34. По истечении времени калибровки показания фазометра должны обнулиться.

6.7.3.6 Перевести переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие номеру точки 2, и руководствуясь методикой раздела Д.5 приложения Д, провести измерение приращения фазового сдвига, вносимого исследуемым четырехполюсником. Результат измерения φ_{12} занести в таблицу 6.4 (точка 1).

Нажать кнопку « $\Delta\varphi$ » на передней панели фазометра Ф2-34. По истечении времени калибровки показания фазометра должны обнулиться.

6.7.3.7 Перевести переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие номеру точки 3, и повторить операции подпункта 6.7.3.6 (точка 2, φ_{23}).

6.7.3.8 Перевести переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие номеру точки 4, и повторить операции подпункта 6.7.3.7 (точка 3, φ_{34}).

6.7.3.9 Перевести переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие номеру точки 1, и повторить операции подпункта 6.7.3.8 (точка 4, φ_{41}).

6.7.3.10 Пользуясь техническими характеристиками фазометра Ф2-34, определить погрешность измерения приращения фазовых сдвигов и занести ее в таблицу 6.4.

6.7.4 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 6.6.2 задания к лабораторной работе.

6.7.4.1 По шкале генератора ГЗ-109 установить в соответствии с номером бригады частоту выходного сигнала f_0 (таблица 6.5). Установить переключатель «КАЛИБРОВКА – ИЗМЕРЕНИЕ» в положение «ИЗМЕРЕНИЕ». Установить переключатели «ВАРИАНТ» лабораторного макета М2 в положения, соответствующие номеру бригады и точке 1.

Таблица 6.5

| Частота, кГц | Номер бригады | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| f_0 | 10 | 15 | 20 | 250 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 |
| f_1 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |
| f_2 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 |
| f_3 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 | 75 | 80 | 85 |
| f_4 | 50 | 55 | 60 | 650 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 | 95 |

Нажать кнопку «Δφ» на передней панели фазометра Ф2-34. По истечении времени калибровки показания фазометра должны обнулиться.

6.7.4.2 Установить частоту выходного сигнала f_1 по шкале генератора Г3-109 (таблица 6.5). Установить переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие точке 2.

Отсчитать измеренное значение приращения фазового сдвига $d\varphi_1$ и занести его в таблицу 6.6.

Нажать кнопку «Δφ» на передней панели фазометра Ф2-34. По истечении времени калибровки показания фазометра должны обнулиться.

Таблица 6.6

| Обозначение параметра | Измеренные и вычисленные параметры | | | |
|--|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| f_i , кГц | $f_0 - f_1$ (.....) | $f_1 - f_2$ (.....) | $f_2 - f_3$ (.....) | $f_3 - f_4$ (.....) |
| $d\varphi_i$, град | | | | |
| $t_{ГР}$, нс | | | | |
| $\Delta t_{ГР}$, нс | | | | |
| Примечание – Разность частот, на которых проводились измерения, указываются в скобках (строка f_i). | | | | |

6.7.4.3 Установить частоту выходного сигнала f_2 (таблица 6.5) и переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие точке 3. Повторить операции подпункта 6.7.4.2 ($d\varphi_2$).

6.7.4.4 Установить частоту выходного сигнала f_3 (таблица 6.4) и переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие точке 4. Повторить операции подпункта 6.7.4.2 ($d\varphi_3$).

6.7.4.5 Установить частоту выходного сигнала f_4 (таблица 6.4) и переключатели «ВАРИАНТ» в положения, соответствующие точке 4. Повторить операции подпункта 6.7.4.2 ($d\varphi_4$).

6.7.4.6 Используя выражение (6.9), определить измеренное значение группового времени запаздывания ($t_{ГР}$) исследуемого четырехполосника, а погрешность его измерения $\Delta t_{ГР}$ рассчитать по формуле (6.11)

$$\Delta t_{ГР} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_{ГР}}{\partial(\Delta\varphi)}\right)^2 \Delta\varphi_i^2 + \left(\frac{\partial t_{ГР}}{\partial(\Delta\omega)}\right)^2 \Delta\omega_i^2}, \quad (6.11)$$

где $\Delta\varphi_i$ – инструментальная погрешность измерения $d\varphi_i$ фазометром Ф2-34;

$\Delta\omega_i$ – инструментальная погрешность установки частоты на генераторе Г3-109.

Результаты расчетов значений величин $t_{ГР}$ и $\Delta t_{ГР}$ занести в таблицу 6.6.

6.7.4.7 Согласовать с преподавателем результаты измерений и приступить к оформлению отчета.

6.8 Контрольные вопросы

1 Что понимается под фазовым сдвигом двух гармонических колебаний?

2 Какое математическое выражение положено в основу измерения фазового сдвига между двумя гармоническими сигналами при реализации метода суммы и разности напряжений?

3 Каким способом производится исключение неоднозначности отсчета значений фазового сдвига при его измерении фазометром, в основу работы которого положен метод суммы и разности напряжений?

4 Укажите правильный ответ. Отсчет измеренного значения фазового сдвига в фазометре, в котором реализован нулевой метод измерения, производится: а) по шкале индикаторного прибора;

б) по шкале измерительного фазовращателя;

в) по шкале установочного фазовращателя.

5 Какое математическое выражение положено в основу измерения фазового сдвига между двумя гармоническими сигналами при реализации метода преобразования фазового сдвига во временной интервал?

6 Приведите математическое выражение, связывающее измеряемое значение фазового сдвига с постоянной составляющей последовательности импульсных сигналов прямоугольной формы, при реализации метода преобразования фазового сдвига во временной интервал.

7 Какой метод измерения фазовых сдвигов положен в основу работы фазометра Ф2-34? В чем сущность данного метода?

8 Приведите структурную схему фазометра, в основу работы которого положен метод суммы и разности напряжений. Поясните принцип и опишите с помощью математических выражений алгоритм ее работы.

9 Укажите причины возникновения погрешности измерения фазовых сдвигов в фазометре, реализующем метод суммы и разности напряжений? Оцените значение погрешности измерения фазовых сдвигов в градусах.

10 Приведите структурную схему фазометра, в основу работы которого положен нулевой метод? Поясните принцип ее работы.

11 С какой целью в структурную схему фазометра, реализующего нулевой метод измерения фазовых сдвигов, введен установочный фазовращатель?

12 Чем обусловлена погрешность измерения фазовых сдвигов фазометром, в основу работы которого положен нулевой метод?

13 Оцените погрешность измерения фазового сдвига между двумя гармоническими сигналами, если его измерение производилось с помощью фазометра, реализующего нулевой метод. Результат измерения равен 97° , цена деления шкалы измерительного фазовращателя – $0,5^\circ$. Запишите результат измерения.

14 Какие типы индикаторных приборов используются в фазометрах, реализующих метод суммы и разности напряжений и нулевой метод?

15 Приведите структурную схему фазометра, реализующего метод преобразования фазового сдвига во временной интервал, и поясните принцип ее работы с использованием временных диаграмм и математических выражений.

16 Чем обусловлена погрешность измерения фазовых сдвигов фазометром, реализующим метод преобразования фазовых сдвигов во временной интервал?

17 Как производится измерение временных интервалов, пропорциональных фазовому сдвигу, в фазометрах, реализующих следующие алгоритмы преобразования: $\Delta\varphi_x \rightarrow \Delta t_x \rightarrow U_x \rightarrow$ цифровой код и $\Delta\varphi_x \rightarrow \Delta t_x \rightarrow$ цифровой код.

18 Что понимается под абсолютным и относительным групповым временем запаздывания (ГВЗ)?

19 В чем суть метода измерения ГВЗ по «точкам»? Приведите алгоритмы его реализации. Назовите основные достоинства и недостатки этого метода.

20 В чем суть модуляционных методов измерения ГВЗ, каковы их достоинства и недостатки?

21 Как определяется погрешность измерения группового времени запаздывания?

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА МИ–7 ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

7.1 Цель работы

7.1.1 Изучение методов измерения параметров двухполусников.

7.1.2 Приобретение практических навыков работы с измерительными приборами Е7-14, Е4-7.

7.1.3 Измерение активного сопротивления, емкости, индуктивности, тангенса угла потерь и добротности двухполусников.

7.1.4 Приобретение практических навыков оценки погрешностей полученных результатов измерений.

7.2 Краткие теоретические сведения

Простейшими видами двухполусников (ДП) в цепях с сосредоточенными постоянными являются: резистор, конденсатор, катушка индуктивности, а также источники ЭДС и тока. В данной работе мы ограничимся лишь рассмотрением методов и средств измерения параметров пассивных ДП. К ним относятся активное сопротивление R , емкость C , тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta$, индуктивность L и добротность Q . Обобщенным параметром ДП является комплексное (полное) сопротивление Z :

$$Z = R + jX = X \cdot (\operatorname{tg}\delta + j) = X \cdot [(1/Q) + j], \quad (7.1)$$

где X – реактивная составляющая Z , которая может иметь индуктивный ($X = \omega L$) или емкостный ($X = 1/\omega C$) характер.

Активное сопротивление R определяет потери энергии в ДП. Для оценки качества конденсатора пользуются величиной тангенса угла потерь $\operatorname{tg}\delta = R\omega C$, а для оценки качества катушки индуктивности – величиной добротности $Q = \omega L/R$, которая характеризует также и колебательный контур.

В некоторых случаях пользуются понятием полной проводимости $Y = 1/Z$, которую также можно представить в комплексной форме. Измерители параметров ДП являются приборами сравнения, основу которых составляют измерительные мосты (мостовой метод измерения) или колебательные системы (резонансный метод измерения). Они могут быть аналоговыми и цифровыми.

7.2.1 Принцип работы **мостовых измерителей параметров** ДП рассмотрим на примере классической мостовой измерительной цепи (МИЦ) (рисунок 7.1). Плечи моста образуют двухполусники Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 , сопротивления которых в общем случае имеют комплексный характер. К генераторной диагонали «а – в» подводится напряжение от источника питания (ИП). В диагональ «б – г» (индикаторная диагональ) включен индикатор равновесия И (гальванометр).

Если МИЦ уравновешена, то показания И равны нулю ($I_{\text{И}} = 0$) и измерительный мост реализует одну из основных модификаций метода сравнения: нулевой метод.

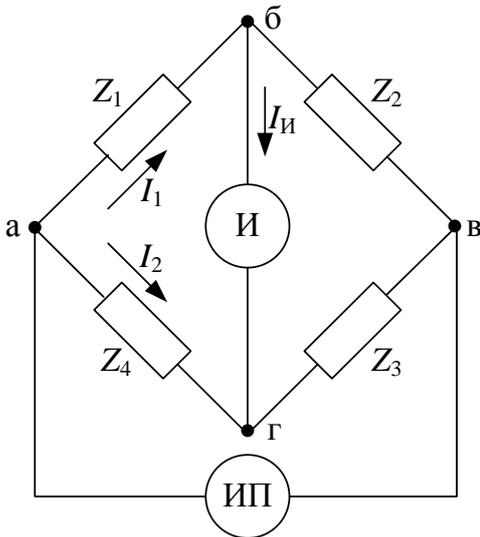


Рисунок 7.1 – Мостовая измерительная цепь

Если объектом измерения является Z_1 , то операция уравновешивания (балансировки) МИЦ производится изменением Z_2, Z_3, Z_4 . Моменту баланса МИЦ соответствует равенство потенциалов точек б и г, что возможно, только когда падение напряжений в плечах Z_1 и Z_4 , а также Z_2 и Z_3 будут равны, т. е. $I_1 \cdot Z_1 = I_2 \cdot Z_4$ и $I_1 \cdot Z_2 = I_2 \cdot Z_3$ при $I_{И} = 0$.

Разделив первое уравнение на второе, получим в общем виде условие баланса МИЦ:

$$Z_1 \cdot Z_3 = Z_2 \cdot Z_4. \quad (7.2)$$

Учитывая, что Z_1, \dots, Z_4 величины комплексные, можно это условие записать в следующем виде:

$$|Z_1| \cdot |Z_3| e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = |Z_2| \cdot |Z_4| \cdot e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}, \quad (7.3)$$

откуда следует условие баланса амплитуд

$$|Z_1| \cdot |Z_3| = |Z_2| \cdot |Z_4| \quad (7.4)$$

и условие баланса фаз

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (7.5)$$

В общем случае уравновешивание МИЦ может быть достигнуто только при одновременном обеспечении баланса амплитуд и фаз. Это требует наличия не менее двух регулируемых элементов. Кроме того, условие (7.5) определяет лишь ограниченное число комбинаций плеч моста в зависимости от характера сопротивлений Z_1, \dots, Z_4 , при которых возможен его баланс. Это и определяет правила построения МИЦ. Например, если в двух смежных плечах включены активные сопротивления, то в двух других плечах могут быть включены катушки индуктивности или конденсаторы. Если же активные сопротивления включены в противоположные плечи, то в одно из двух других противоположных плеч может включаться катушка индуктивности, а в другое – конденсатор.

Если окончательное измерительное состояние МИЦ таково, что $I_{И} \neq 0$ (мост является неуравновешенным), то реализуется другая модификация метода сравнения – дифференциальный метод.

Чувствительность МИЦ определяется по формуле

$$S_M = \frac{\Delta \alpha}{\Delta z} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta I_{И}} \cdot \frac{\Delta I_{И}}{\Delta z} = S_I \cdot S_{МИЦ}, \quad (7.6)$$

где $\Delta \alpha$ – отклонение стрелки индикатора И при изменении сопротивления одного из плеч на Δz ;

$\Delta I_{И}$ – изменение тока $I_{И}$, пропорциональное $\Delta \alpha$;

S_I – чувствительность индикатора по току;

S_M – чувствительность МИЦ, которая максимальна для равноплечих МИЦ ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z_4$).

Другой характеристикой моста является сходимость, которая характеризует способность моста приходиться к состоянию равновесия путем большего или меньшего числа последовательных регулировок его элементов. Согласно условиям (7.4) и (7.5), сходимость может быть равна двум. На практике она больше, т. к. изменение сопротивления любого элемента моста одновременно влияет на баланс амплитуд и на баланс фаз. Поэтому необходимы поочередные переходы от регулировки одного элемента к регулировке другого.

МИЦ, применяемые в измерителях параметров ДП, имеют широкую классификацию по целому ряду признаков:

– по типу применяемого ИП делятся на мосты постоянного и переменного тока;

– в зависимости от количества плеч делятся на четырехплечные и многоплечные мосты;

– по виду ДП (для мостов переменного тока), образующих плечи МИЦ, выделяют мосты типов МЕ (для измерения C), МИ (для измерения L), МИЕ (для измерения C и L), МЕП (для измерения C и $\text{tg}\delta$), МИП (для измерения L и Q) и МИЕП (универсальные);

– в зависимости от схемы построения МИЦ различают трансформаторные мосты (с индуктивно-связанными плечами), Т-образные мосты, компенсационные мосты, реализующие функции измерительных мостов и компенсаторов;

– по способу уравнивания МИЦ мосты могут быть с ручным уравниванием и автоматическим.

Для расширения пределов измерений, кроме обычных (одинарных) мостов постоянного и переменного тока, применяют двойные и одинарно-двойные мосты.

Достоинством измерительных мостов всех видов является высокая точность измерения параметров ДП, характерная для приборов сравнения. Мосты постоянного тока могут иметь класс точности: 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2 и 5, а мосты переменного тока – 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2 и 5.

7.2.1.1 Область применения измерительных мостов постоянного тока – измерение активного сопротивления R_X . На основе таких мостов строятся омметры (более сложные и точные приборы).

Простейшая схема одинарного измерительного моста постоянного тока – это частный случай обобщенной схемы, изображенной на рисунке 7.1, у которой $Z_1 = R_X$; $Z_2 = R_2$; $Z_3 = R_3$; $Z_4 = R_4$. Для таких мостов общее условие равновесия (7.2) упрощается и записывается в виде $R_X \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$, откуда и находят неизвестное сопротивление R_X :

$$R_x = R_2 \frac{R_4}{R_3} . \quad (7.7)$$

Из (7.7) следует, что уравнивание МИЦ может осуществляться двумя способами:

- изменением R_2 при $R_4/R_3 = \text{const}$ – магазинные мосты;
- изменением R_4/R_3 при $R_2 = \text{const}$ – линейные мосты.

Наибольшее распространение получили магазинные мосты, т. к. R_2 можно конструктивно выполнить в виде высокоточного магазина сопротивлений, а для расширения пределов измерений R_x можно изменять R_4/R_3 ступенями, кратными 10. В линейных мостах для плавного изменения R_4/R_3 используют реохорд, который по своим характеристикам (точности и надежности) значительно хуже магазина сопротивлений.

Если в качестве индикатора И в МИЦ используется высокочувствительный магнитоэлектрический микроамперметр или гальванометр, то такие мосты могут измерять значения R_x в диапазоне $1-10^6$ Ом. Для расширения пределов измерения R_x в сторону больших (до 10^{16} Ом) и малых (до 10^{-8} Ом) значений применяют дополнительные схемные и конструктивные решения.

7.2.1.2 Рассмотрим некоторые схемы измерительных мостов переменного тока.

Мосты типа МЭП обеспечивают измерение емкости C_x и тангенса угла потерь $\text{tg}\delta_x$. Схема моста при последовательном замещении измеряемого конденсатора приведена на рисунке 7.2. Эта схема замещения используется при измерении конденсаторов с малыми потерями (малым значением $\text{tg}\delta$). Схема моста при параллельной схеме замещения измеряемого конденсатора с большими потерями (большим значением $\text{tg}\delta$) приведена на рисунке 7.3.

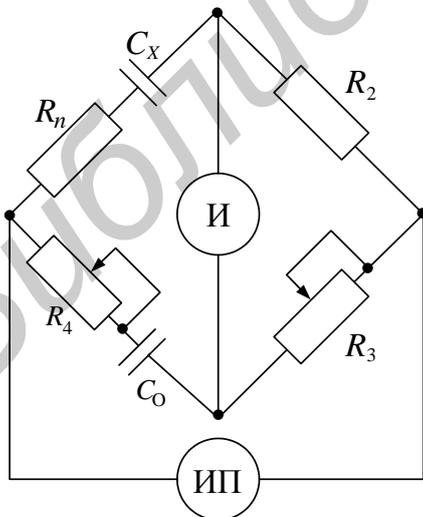


Рисунок 7.2 – МЭП при последовательной схеме замещения C_x

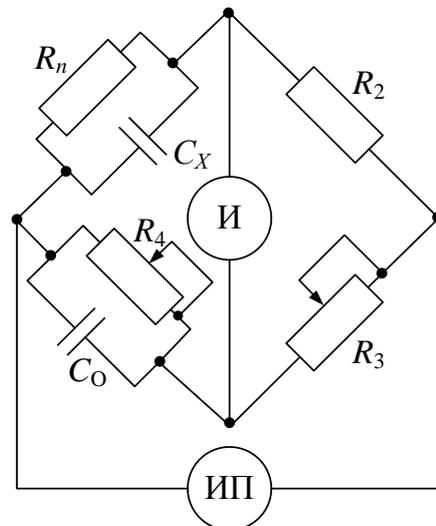


Рисунок 7.3 – МЭП при параллельной схеме замещения C_x

Из условия равновесия (7.2) для схемы рисунка 7.2 можно получить измеренные значения емкости конденсатора и тангенса угла потерь:

$$C_C = \frac{R_3}{\omega R_2}; \quad \operatorname{tg} \delta_X = \omega R_n C_X = \omega C_0 R_4. \quad (7.8)$$

Из соотношений (7.8) следует, что уравнивание МИЦ проще всего осуществить изменением R_3 и R_4 при постоянной емкости C_0 образцового конденсатора. При этом шкала R_3 может быть проградуирована в значениях C_X , а шкала R_4 – в значениях $\operatorname{tg} \delta$ (на фиксированной частоте измерения). Ступенчатым изменением R_2 удобно расширять пределы измерения C_X .

Из выражения (7.8) видно, что схема моста при измерении C_X частотно независима. Это является важным достоинством мостов типа МЭП и позволяет применять их для измерения C_X на рабочей частоте. С помощью таких мостов можно измерять емкости от десятых долей пикофарад до десятков микрофарад с погрешностью 1–3 %.

Аналогично можно получить выражения для $C_X \operatorname{tg} \delta_X$ для моста при параллельной схеме замещения измеряемого конденсатора с большими потерями (большим значением $\operatorname{tg} \delta$). Свойства этой схемы полностью аналогичны рассмотренной схеме моста.

Мосты типа МИП предназначены для измерения L_X и Q_X . В них в качестве высокоточной меры используют конденсатор. МИП для измерения L_X с малым значением Q_X (менее 30) проектируется по параллельной схеме замещения L_X (рисунок 7.4), а для измерения L_X с большим значением Q_X (более 30) – по последовательной (рисунок 7.5).

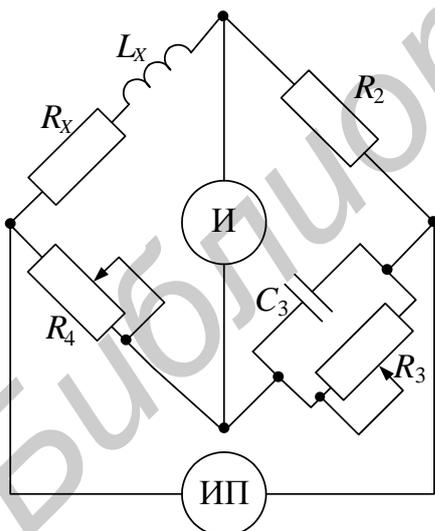


Рисунок 7.4 – МИЦ для измерения L_X с $Q_X < 30$

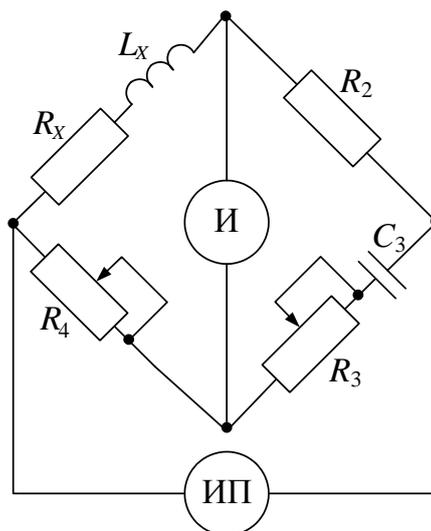


Рисунок 7.5 – МИЦ для измерения L_X с $Q_X > 30$

Из уравнения баланса моста можно получить выражения для расчета L_X и Q_X . В состоянии равновесия схемы рисунка 7.4:

$$L_X = C_3 R_2 R_4; \quad Q_X = \omega C_3 R_3,$$

а равновесия схемы рисунка 7.5:

$$L_x = C_3 R_2 R_4; \quad Q_x = \frac{1}{\omega C_3 R_3}.$$

Мост типа МИП является частотно-независимым при измерении L_x .

Универсальный мост МИЕП предназначен для измерения R_x , C_x , L_x , $\text{tg}\delta_x$, Q_x и синтезирован из мостов МЕР и МИП, а различные режимы измерения осуществляются коммутацией его плеч.

Более подробно измерительные мосты рассмотрены в [1–4].

7.2.2 Резонансные методы измерения параметров ДП основаны на использовании резонансных свойств колебательного контура и сводятся к определению степени влияния измеряемого ДП на параметры образцовой колебательной системы в момент настройки ее в резонанс. Резонансные измерители являются универсальными приборами, среди которых наибольшее распространение получили куметры (Q_x). Современные куметры работают в диапазоне частот от 1кГц до 300 МГц.

Упрощенная структурная схема универсального измерителя параметров ДП контурного типа представлена на рисунке 7.6. Основой измерителя является измерительный резонансный контур, связанный с генератором ($\Gamma \sim$) и индикатором резонанса (вольтметром). Как видно из рисунка 7.6, связь измерительного контура с генератором осуществляется с помощью емкостного делителя $C_1 C_2$, а делитель $C_3 C_4$ служит для уменьшения потерь, вносимых в контур вольтметром. В контур включен эталонный (образцовый) конденсатор переменной емкости C_0 , а к зажимам 1–5 могут подключаться эталонная катушка индуктивности L_0 и измеряемые ДП (L_x , C_x). Генератор вырабатывает синусоидальное напряжение, стабильное по частоте и амплитуде. В режиме калибровки измерителя (положение «Калибр.» переключателя) по показаниям вольтметра производится установка требуемого напряжения на выходе генератора.

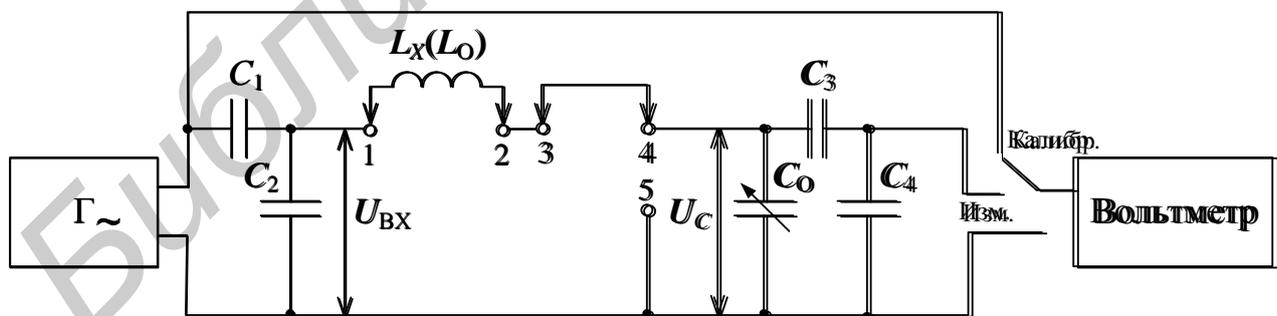


Рисунок 7.6 – Упрощенная структурная схема резонансного измерителя параметров ДП контурного типа

Для обеспечения правильности измерений связь измерительного контура с генератором должна быть минимальной. Характер этой связи может быть не только емкостный, как это показано на рисунке 7.6, но и гальванический, ин-

дуктивный, трансформаторный, применяемый на высоких частотах (ВЧ).

Принцип работы измерителя заключается в определении собственной частоты колебательного контура f_p , составленного из L_0 или C_0 и измеряемого ДП (C_X или L_X). Плавно изменяя частоту генератора (f_Γ) и значение одного из элементов контура (обычно C_0), добиваются совпадения $f_\Gamma = f_p$. Момент резонанса фиксируют вольтметром, а значения f_p и C_0 определяют по соответствующим шкалам измерителя. Искомое значение L_X или C_X рассчитывают из формулы

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{0(X)} \cdot C_{X(0)}}} . \quad (7.9)$$

Так как создание на низких частотах высокодобротных колебательных систем с резким проявлением резонанса и точной его фиксацией затруднено, резонансный метод получил распространение только в области ВЧ. На ВЧ эквивалентные схемы простейших ДП становятся сложными, и поэтому резонансным методом, как правило, измеряются эквивалентные (эффективные) параметры ДП. Это означает, что измерения нужно проводить на той частоте, на которой будет работать измеряемый ДП при дальнейшем его применении.

Погрешность резонансного метода определяется неточностью настройки контура в резонанс, погрешностью установки или отсчета частоты генератора и ее нестабильностью за время измерения, погрешностью отсчета C_0 , а также относительной величиной паразитных параметров измерительного контура.

Повышение точности измерения L_X и C_X достигается применением резонансного метода в сочетании с методом замещения. Процесс измерения сводится к установке нужного режима работы измерителя без исследуемого ДП и восстановлению этого режима после подключения ДП путем изменения значения C_0 .

Как известно, в момент резонанса отношение напряжений U_C к $U_{ВХ}$ достигает максимума и равно

$$\frac{U_{CX}}{U_{ВХ}} = \frac{1}{\omega C_0 R_X} = \frac{\omega L}{R_X} = Q . \quad (7.10)$$

Таким образом, если значение $U_{ВХ}$ поддерживать во время измерения постоянным, то шкалу вольтметра, подключенного параллельно C_0 , можно градуировать непосредственно в значениях Q .

Более подробно методы измерения параметров ДП на ВЧ и режимы работы измерителей рассмотрены в [1–4].

7.2.3 Для создания цифровых измерителей параметров ДП (ЦИП) на базе аналоговых необходимо обеспечить представление в дискретной форме сигналов в цепи обратного преобразования и цифровую индикацию результата.

Основой современных ЦИП являются автокомпенсационные измерительные мосты, которые могут быть двух видов – квадратурные и экстремальные. Упрощенная структурная схема ЦИП с автокомпенсационным квадратурным мостом приведена на рисунке 7.7.

Как видно из рисунка 7.7, напряжение с выхода генератора (Γ) подается на мостовую измерительную цепь (МИЦ), в плечах которой находятся измеря-

емый ДП и переключаемые уравнивающие образцовые меры. Выбор образцовых мер осуществляется в зависимости от диапазона измерения, рабочей частоты, характера измеряемого ДП и схемы его замещения блоком автоматического уравнивания (БУ) через переключатель конфигурации измерительной цепи (П) до полного уравнивания МИЦ. Одновременно БУ управляет реверсивным счетчиком (РС), который изменяет состояние уравнивающих образцовых мер МИЦ.

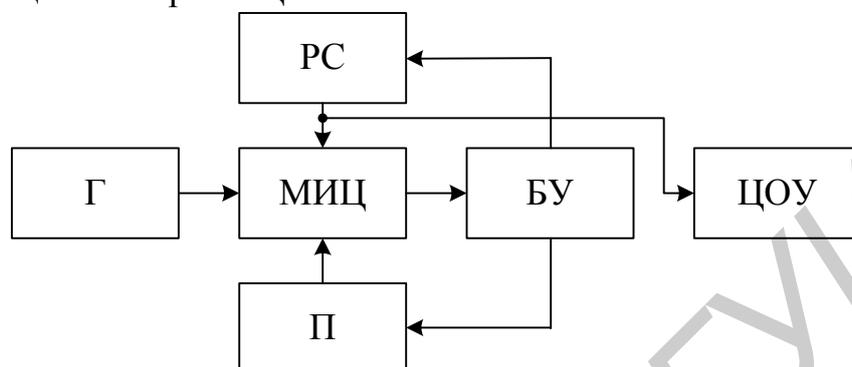


Рисунок 7.7 – Структурная схема автоматического цифрового универсального измерителя параметров ДП

В результате калибровки определяются и запоминаются корректирующие коэффициенты, соответствующие мультипликативной погрешности ЦИП. При выполнении измерений к МИЦ подключается исследуемый ДП и осуществляется уравнивание МИЦ. В состоянии полного баланса МИЦ код с выхода РС (с учетом корректирующих коэффициентов), соответствующий измеренному значению параметра ДП, подается на цифровое отсчетное устройство (ЦОУ), которое представляет результат измерения в десятичной системе счисления.

В состав схем ЦИП дополнительно входят делители, блоки умножения, запоминающие устройства, переключатели режимов работы, блок связи с внешним запоминающим устройством, обеспечивающие работу ЦИП в автоматическом режиме, проведение калибровки, поверки, сохранения корректирующих коэффициентов и необходимой рабочей информации.

Более подробно ЦИП и используемые в них методы преобразования измеряемых параметров рассмотрены в [1–4].

7.3 Приборы, используемые при выполнении работы

В ходе выполнения работы используются приборы:

- измеритель иммитанса Е7-14 (приложение Ж).
- измеритель добротности Е4-7 (приложение И).

7.4 Описание лабораторного макета

Лабораторный макет (рисунок 7.8) представляет собой набор ДП – объектов измерения (резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности). Конкретный набор ДП выбирается переключателем «ВАРИАНТ». В пределах каждого варианта для измерений предлагаются по два ДП каждого вида. Номер ДП выбирается

переключателем «НОМЕРА ТОЧЕК». Для измерения параметров резисторов измеритель подключают к клеммам «СОПРОТИВЛЕНИЕ», конденсаторов – к клеммам «ЕМКОСТИ», катушек индуктивности – к клеммам «ИНДУКТИВНОСТИ».

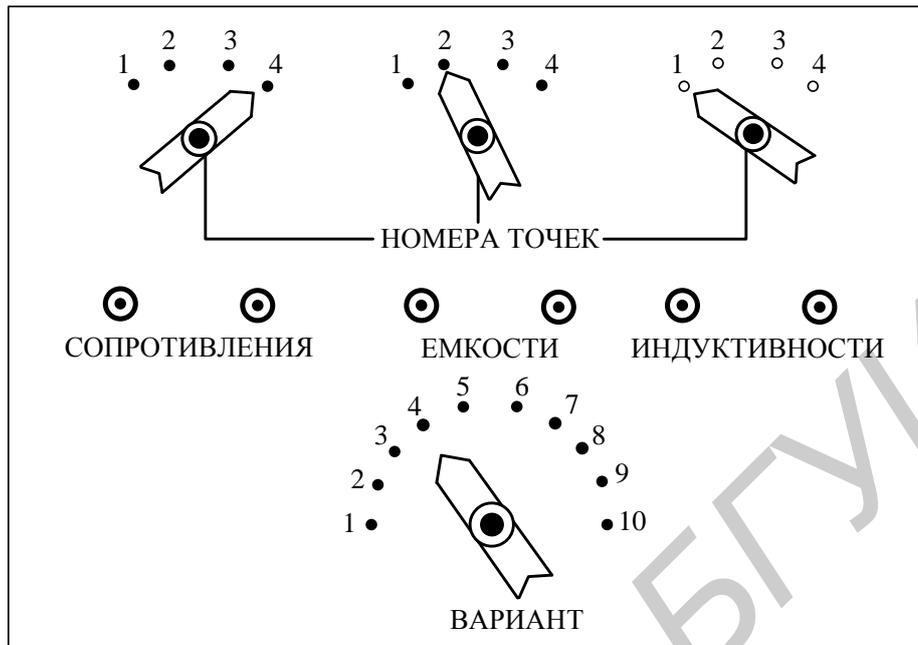


Рисунок 7.8 – Передняя панель лабораторного макета

7.5 Подготовка к выполнению работы

7.5.1 По рекомендуемой литературе и подразделу 7.2 изучить методы измерения параметров ДП и принцип работы измерителей этих параметров.

7.5.2 По приложениям Ж и И изучить устройство, принцип действия и характеристики приборов Е7-14, Е4-7, а также методики проведения измерений с их помощью.

7.5.3 Ответить на контрольные вопросы.

7.5.4 Сделать заготовку отчета (одну на бригаду) по лабораторной работе в соответствии с требованиями раздела «Содержание отчета» данного учебно-методического пособия.

7.5.5 Выполнить домашнее задание и включить его в заготовку отчета.

Определить параметры заданного ДП (таблица 7.1), измеряемые с помощью моста, если в уравновешенном состоянии значения элементов моста соответствуют значениям, приведенным в таблице 7.1. Нарисовать схему используемого измерительного моста. Номер варианта соответствует номеру бригады.

7.6 Задания к лабораторной работе

7.6.1 Измерить параметры заданных ДП с помощью измерителя иммитанса Е7-14.

7.6.2 Измерителем добротности Е4-7 определить нижнюю и верхнюю граничные частоты рабочего диапазона (f_H и f_B) заданной образцовой катушки

индуктивности и измерить ее значение (L_X).

7.6.3 Измерить параметры заданных ДП резонансным методом и методом замещения.

7.6.4 Измерителем добротности Е4-7 провести измерения полных сопротивлений заданных ДП.

Таблица 7.1

| Номер бригады | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------------------|-------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|-------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|-------|----------------|----------------------------|----------------|
| Измеряемый параметр | R_X | C_X $\text{tg}\delta$ | L_X Q_X | C_X $\text{tg}\delta$ | L_X Q_X | R_X | C_X $\text{tg}\delta$ | L_X Q_X | C_X $\text{tg}\delta$ | L_X Q_X | R_X | L_X Q_X | C_X $\text{tg}\delta$ | L_X Q_X |
| Схема замещения | – | Послед. | Послед. | Парал. | Парал. | – | Парал. | Послед. | Послед. | Парал. | – | Парал. | Послед. | Послед. |
| R_2 , кОм | 0,2 | 0,1 | 0,5 | 0,15 | 2,7 | 1,5 | 0,25 | 0,35 | 0,45 | 0,3 | 3,6 | 0,33 | 4,7 | 0,62 |
| R_3 , кОм | 3,0 | 2,0 | 4,0 | 1,0 | 4,7 | 3,3 | 1,5 | 2,1 | 3,8 | 7,3 | 2,7 | 1,5 | 5,1 | 2,0 |
| R_4 , кОм | 1,5 | 5,2 | 2,1 | 3,0 | 15 | 18 | 2,0 | 3,7 | 7,1 | 5,2 | 22 | 2,7 | 24 | 7,5 |
| C_0 , нФ | – | 47 | 18 | 82 | 5,1 | – | 56 | 22 | 33 | 8,2 | – | 47 | 18 | 56 |

7.7 Порядок выполнения работы

7.7.1 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 7.6.1 задания к лабораторной работе.

7.7.1.1 Подготовить к проведению измерений измеритель иммитанса Е7-14 согласно разделу Ж.4 приложения Ж.

7.7.1.2 Переключателем «ВАРИАНТ» установить номер варианта в соответствии с номером бригады согласно таблице 7.2.

Таблица 7.2

| Номер бригады | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Номера исслед. ДП (C, L, R) | 1, 2 | 2, 3 | 3, 1 | 4, 3 | 2, 4 | 4, 1 | 1, 2 | 3, 1 | 1, 4 | 2, 3 | 4, 2 | 3, 4 | 2, 3 | 3, 4 |

7.7.1.3 Руководствуясь методикой, изложенной в разделе Ж.5 приложения Ж, измерить параметры исследуемых ДП: конденсаторов (емкость – C_X , фактор потерь – D_X), катушек индуктивности (индуктивность – L_X , добротность – Q_X и фактор потерь – D_X) и резисторов (сопротивление – R_X , добротность – Q_X), номера которых указаны в таблице 7.2. Результаты измерений занести в таблицу 7.3.

7.7.1.4 Пользуясь техническими характеристиками Е7-14 (таблица Ж.1), рассчитать инструментальные погрешности измерения сопротивления (Δ_R), ем-

кости (Δ_C), индуктивности (Δ_L). Результаты расчетов занести в таблицу 7.3.

7.7.2 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 7.6.2 задания к лабораторной работе.

Таблица 7.3

| Измеренные и рассчитанные параметры | Резисторы | | | | Конденсаторы | | | | Катушки индуктивности | | | | |
|-------------------------------------|-----------|-------|-------|------------|--------------|-------|-------|------------|-----------------------|-------|-------|-------|------------|
| | R_X | Q_X | R_K | Δ_R | C_X | D_X | C_K | Δ_C | L_X | Q_X | D_X | L_K | Δ_L |
| Единица измерения | | | | | | | | | | | | | |
| Исследуемый ДП № _____ | | | | | | | | | | | | | |
| Исследуемый ДП № _____ | | | | | | | | | | | | | |

7.7.2.1 Подготовить к проведению измерений прибор Е4-7 согласно разделу И.4 приложения И.

7.7.2.2 Выбрать из комплекта образцовых катушек индуктивности прибора Е4-7 в качестве объекта измерения заданную катушку индуктивности, номер которой указан в соответствии с номером бригады в таблице 7.4.

Таблица 7.4

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| Номер бригады | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Номер заданной катушки индуктивности | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 5 | 2 | 3 | 8 | 7 | 5 |

7.7.2.3 Подключить заданную катушку индуктивности к клеммам « L_X » прибора Е4-7. Установить ручкой «ПРЕДЕЛЫ Q » наименьший предел. Установить ручкой «ЕМКОСТЬ pF» минимальное значение емкости образцового конденсатора ($C_{\min} = 30$ пФ) и, изменяя частоту генератора ручкой «ЧАСТОТА $\frac{\text{kHz}}{\text{MHz}}$ » и переключателем поддиапазонов частоты (от 50 кГц до 35 МГц), добиться максимального отклонения стрелки индикатора резонанса Q . Отсчитать по шкале генератора значение частоты f_B , занести его в таблицу 7.5. При зашкаливании стрелки индикатора резонанса Q , ΔQ увеличить предел измерения Q . Установить максимальное значение емкости образцового конденсатора ($C_{\max} = 450$ пФ) и аналогичным образом, добившись резонанса, определить значение частоты f_H , занести его в таблицу 7.5.

7.7.2.4 Выбрать в диапазоне от f_B до f_H любое значение частоты $f_{\text{ИЗМ}}$ и установить эту частоту на шкале генератора прибора. Изменением емкости образцового конденсатора настроить контур в резонанс, изменяя при зашкаливании стрелки индикатора его чувствительность переключателем «ПРЕДЕЛЫ Q ». Отсчитать полученное значение емкости образцового конденсатора C_0 . Резуль-

таты измерения C_0 занести в таблицу 7.5. Определить измеренное действующее значение индуктивности $L_{XД}$ из формулы (7.9).

Таблица 7.5

| Измеренные и рассчитанные параметры | f_B | f_H | $f_{изм}$ | C_0 | $L_{XД}$ | $\delta L_{XД}$ | C_L | L_X | δL_X |
|--|-------|-------|-----------|-------|----------|-----------------|-------|-------|--------------|
| Единица измерения | | | | | | | | | |
| Исследуемая катушка индуктивности № _____ | | | | | | | | | |

7.7.2.5 По характеристикам Е4-7 (раздел И.2 приложения И) определить относительную инструментальную погрешность измерения $L_{XД}$ ($\delta L_{XД}$).

7.7.2.6 Определить аналитическим методом по двум измерениям собственную емкость исследуемой катушки индуктивности C_L . По двум измеренным значениям частоты (f_1 и f_2) и двум соответствующим им значениям емкости образцового конденсатора (C_{O1} и C_{O2}), при которых контур, образованный L_X и C_0 , настроен в резонанс, рассчитать C_L по формуле

$$C_L = \frac{C_{O2} - n^2 \cdot C_{O1}}{n^2 - 1},$$

где $n = f_1/f_2$.

Рассчитать истинное значение индуктивности L_X по формуле

$$L_X = \frac{1}{(2\pi f_{изм})^2 C_{O+L}}.$$

7.7.2.7 Определить относительную погрешность измерения L_X (δL_X) из-за наличия собственной емкости C_L катушки как процентное отличие действующего значения индуктивности $L_{XД}$ от истинного L_X .

7.7.2.8 Результаты расчетов C_L , $L_{XД}$, L_X , δL_X и $\delta L_{XД}$ занести в таблицу 7.5.

7.7.3. Выполнить измерения в соответствии с пунктом 7.6.3 задания к лабораторной работе.

7.7.3.1. Руководствуясь методикой, изложенной в пункте И.5.3.1 приложения И, измерить резонансным методом емкости (C_p) ДП (номера указаны в таблице 7.2).

7.7.3.2 Результаты измерений f_p и расчетов (C_K и C_p) занести в таблицу 7.6.

7.7.3.3. Руководствуясь методикой, изложенной в пункте И.5.3.2 приложения И, измерить методом замещения емкость (C_3) тех же ДП.

7.7.3.4 Определить относительную погрешность δ_p измерения емкости резонансным методом из-за наличия паразитных параметров контура, приняв за действительное значение емкость, измеренную методом замещения C_3 , и инструментальную погрешность измерения C_3 (δ_3).

7.7.3.5 Результаты измерений (C_0) и расчетов (C_3 , δ_p , δ_3) занести в таблицу 7.6.

7.7.3.6 Руководствуясь методикой, изложенной в подразделе И.5.2 приложения И, измерить резонансным методом значения индуктивностей (L_P) ДП (номера указаны в таблице 7.2).

Таблица 7.6

| Измеренные и рассчитанные параметры | f_P | C_K | C_P | C_O | C_3 | δ_P | δ_3 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|------------|
| Единица измерения | | | | | | | |
| Исследуемый ДП № _____ | | | | | | | |
| Исследуемый ДП № _____ | | | | | | | |

7.7.3.7 По характеристикам прибора Е4-7 определить относительную инструментальную погрешность измерения L_P (δ_{L_P}).

7.7.3.8 Результаты измерений ($f_{ИЗМ}$, C_{O_L}) и расчетов (L_P , δ_{L_P}) занести в таблицу 7.7.

Таблица 7.7

| Измеренные и рассчитанные параметры | $f_{ИЗМ}$ | C_{O_L} | L_P | δ_{L_P} |
|-------------------------------------|-----------|-----------|-------|----------------|
| Единица измерения | | | | |
| Исследуемый ДП № _____ | | | | |
| Исследуемый ДП № _____ | | | | |

7.7.4 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 7.6.4.

7.7.4.1. Руководствуясь методикой, изложенной в подразделе И.5.4 приложения И, измерить полные сопротивления первых из заданных ДП.

7.7.4.2 Определить относительную инструментальную погрешность косвенного измерения составляющих полного сопротивления ДП прибором Е4-7 по формулам:

$$\delta_R = \sqrt{\left(\frac{C_1 Q_2}{C_2 Q_1 - C_1 Q_2}\right)^2 (\delta_{Q_1}^2 + \delta_{C_1}^2) + \left(\frac{C_2 Q_1}{C_2 Q_1 - C_1 Q_2}\right)^2 (\delta_{Q_2}^2 + \delta_{C_2}^2) + \delta_f^2};$$

$$\delta_x = \sqrt{\left(\frac{C_1}{C_2 - C_1}\right)^2 \delta_{C_1}^2 + \left(\frac{C_2}{C_2 - C_1}\right)^2 \delta_{C_2}^2 + \delta_f^2},$$

где δ_{C_1} , δ_{C_2} , δ_{Q_1} , δ_{Q_2} , δ_f – инструментальные погрешности измерения C , Q и f прибором Е4-7.

7.7.4.3 Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 7.8.

7.7.5 Согласовать с преподавателем результаты, выключить приборы и приступить к оформлению отчета.

Таблица 7.8

| Измеренные и рассчитанные параметры | Единица измере- ния | Номера исследуемых двухполосников | | |
|---|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| | | Сопротивление, R , № _____ | Емкость, C , № _____ | Индуктивность, L , № _____ |
| Измеренные | f | | | |
| | C_1 | | | |
| | Q_1 | | | |
| | C_2 | | | |
| | Q_2 | | | |
| Рассчитанные | R | | | |
| | δ_R | % | | |
| | X | | | |
| | δ_X | % | | |
| | C или L | | | |
| | Q | | | |

7.8 Контрольные вопросы

- 1 Назовите основные виды ДП и их измеряемые параметры.
- 2 Перечислите и поясните методы измерения параметров ДП.
- 3 Приведите схему и поясните принцип действия мостовых измерителей параметров ДП.
- 4 Запишите обобщенное условие равновесия мостов и поясните правила построения мостовых схем.
- 5 Приведите схему и поясните принцип работы, особенности, источники погрешностей моста постоянного тока.
- 6 Приведите схему и поясните принцип работы моста типа МЕР.
- 7 Приведите схему и поясните принцип работы моста типа МИП.
- 8 Поясните работу мостов типа МИЕР.
- 9 Поясните, что такое чувствительность и сходимость моста.
- 10 Поясните резонансный метод измерения параметров ДП.
- 11 Приведите структурную схему и поясните принцип работы резонансного измерителя параметров ДП контурного типа.
- 12 Какие факторы влияют на погрешности измерения измерителем добротности и какие меры принимают для уменьшения их влияния?
- 13 Что такое действующее значение индуктивности и как оно измеряется с помощью измерителя добротности?
- 14 Как определяется истинное значение индуктивности?
- 15 Что такое собственная емкость катушки индуктивности; на что она влияет и как определяется?

16 Как измерить емкость резонансным методом и методом замещения?

17 Поясните методику измерения измерителем добротности составляющих полного сопротивления двухполюсников.

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА МИ–8

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРА, МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ И НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

8.1 Цель работы

8.1.1 Изучение методов анализа спектра и измерение параметров спектра сигналов.

8.1.2 Изучение методов измерения нелинейных искажений сигналов.

8.1.3 Изучение методов измерения параметров модулированных сигналов.

8.1.4 Изучение устройства и принципа действия приборов СК4-58, СК3-43, С6-5, Г4-107 и приобретение практических навыков работы с ними.

8.2 Краткие теоретические сведения

Для проведения анализа и измерения параметров спектра, нелинейных искажений и модуляции используются приборы подгруппы С (С2 и С3 – измерители параметров модуляции; С4 – анализаторы спектра; С6 – измерители нелинейных искажений сигналов).

8.2.1 Рассмотрим основные положения **анализа спектра сигналов**. Сложные сигналы практически любой формы могут быть представлены набором синусоидальных колебаний – гармоник с частотами, кратными основной частоте (первой гармоники). Эту возможность теоретически обосновал французский математик Жан Батист Жозеф Фурье (1768–1830 гг.). В основу спектральных методов анализа положено преобразование Фурье для временной функции, описывающей исследуемый сигнал. Периодические сигналы представляют как функции времени $U_X(t)$ на отрезке $[0, T]$ с периодом $T = 1/f_1$, где f_1 – частота первой гармоники периодического сигнала. Преобразование Фурье позволяет представить сложный процесс множеством гармонических составляющих, описываемых рядом

$$U_X(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi f_1 k t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin(2\pi f_1 k t), \quad (8.1)$$

где

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T U_X(t) \cos(2\pi f_1 k t) dt \quad (8.2)$$

и

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T U_X(t) \sin(2\pi f_1 k t) dt. \quad (8.3)$$

В этом случае коэффициенты a_k (8.2) и b_k (8.3) ряда (8.1) описывают косинусную и синусную составляющие k -й гармоники сигнала с периодом T и частотой f_1 .

Часто используется иная форма ряда Фурье, упрощающая его анализ:

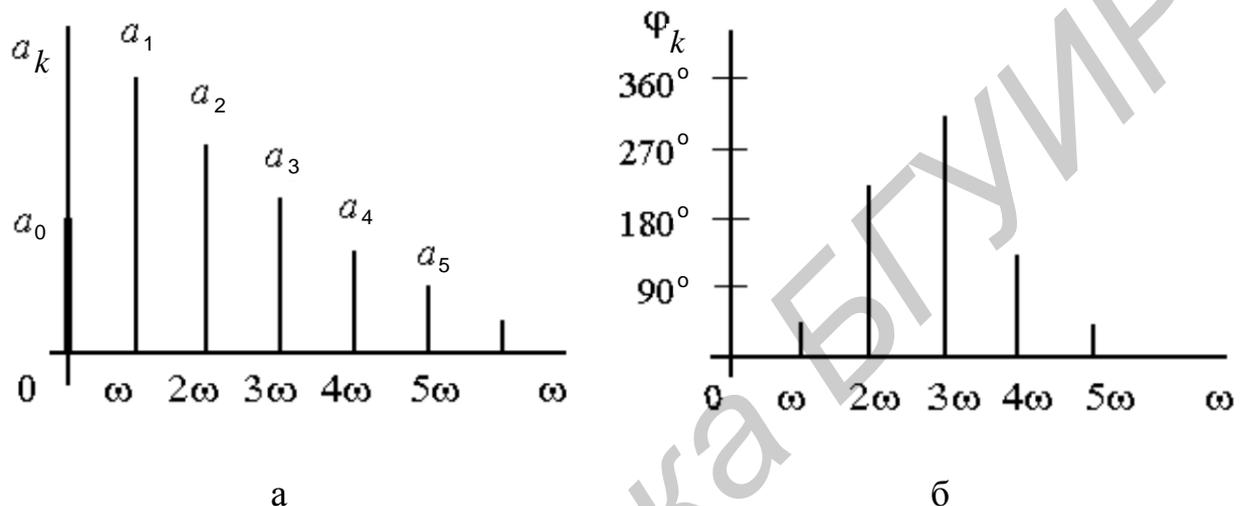
$$U_x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} M_k \cos(2\pi f_1 k t + \varphi_k), \quad (8.4)$$

где амплитуды гармоник M_k и их начальные фазы φ_k определяются выражениями

$$M_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}; \quad (8.5)$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \left(\frac{b_k}{a_k} \right). \quad (8.6)$$

Виды амплитудного и фазового спектров периодического сигнала приведены на рисунке 8.1.



а – амплитудный спектр; б – фазовый спектр

Рисунок 8.1 – Спектрограмма исследуемого периодического сигнала

Разложение функции на гармонические составляющие, т. е. определение коэффициентов Фурье, принято называть спектральным анализом. Гармонику с $k = 1$ называют основной или первой гармоникой сигнала. Она задает частоту повторения сигнала f_1 . Остальные гармоники называют высшими, их частоты равны $f_k = k f_1$, где $k = 2, 3, 4, \dots$.

Таким образом, спектр периодических сигналов является дискретным. Он содержит набор гармонических составляющих (см. рисунок 8.1) с различными амплитудами и фиксированными частотами f_k , где $k = 1, 2, 3, \dots$.

Из известных методов анализа спектра сигналов (метод фильтрации, дисперсионно-временной и рециркуляционный) в анализаторах спектра чаще всего реализуется метод фильтрации. Метод заключается в выделении и анализе составляющих спектра селективным фильтром с узкой полосой пропускания. Наибольшее распространение получили фильтровые анализаторы спектра последовательного действия, позволяющие исследовать периодические и другие виды сигналов, спектры которых практически не изменяются при проведении измерений. Упрощенная структурная схема такого анализатора представлена на рисунке 8.2.

Генератор развертки вырабатывает пилообразное напряжение, которое подается на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки

(ЭЛТ) и вызывает отклонение луча по оси x . Это же напряжение поступает на генератор сигналов качающейся частоты (ГСКЧ), управляет перестройкой частоты, вызывая тем самым линейное изменение во времени его частоты.

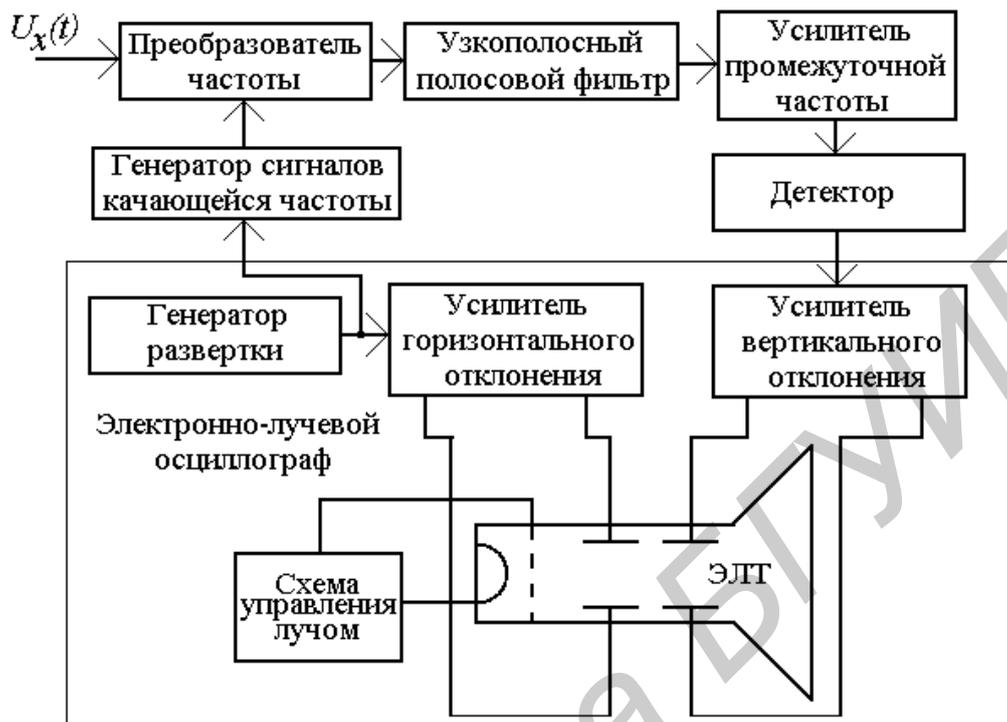


Рисунок 8.2 – Упрощенная схема анализатора спектра

Исследуемый сигнал подается на преобразователь частоты, на гетеродинный вход которого поступает постоянное по амплитуде выходное напряжение ГСКЧ. На выходе преобразователя образуются сигналы комбинационных частот. С помощью узкополосного фильтра выделяется спектральная составляющая разностной частоты исследуемого и выходного ГСКЧ сигналов, которая затем усиливается усилителем промежуточной частоты и детектируется детектором среднеквадратичного значения. Проректированное постоянное напряжение после усилителя вертикального отклонения подается на пластины ЭЛТ.

При перестройке частоты ГСКЧ происходит последовательное выделение спектральных составляющих исследуемого сигнала, амплитуда которых индицируется на экране ЭЛТ в координатах частота – напряжение.

В анализаторах спектра ось частот калибруется с помощью частотных меток или маркера. В простейшем случае для создания частотной метки используется генератор гармонического сигнала, частота которого устанавливается оператором и считывается со шкалы этого генератора. Это напряжение поступает на вход анализатора и вызывает выброс на экране ЭЛТ – частотную метку. Совмещая метку со спектральными составляющими, измеряют частоты последних.

Амплитуду спектральных составляющих можно измерять по масштабной сетке, помещенной перед экраном ЭЛТ анализатора, либо с помощью аттенюаторов анализатора спектра. Методика измерения амплитуды подробно рассмотрена в литературе [1–4].

8.2.2 Под **нелинейными искажениями** понимается любое изменение формы сигнала, обусловленное нелинейностью тракта передачи при прохождении через него исследуемого сигнала. На практике наиболее часто для оценки нелинейных искажений сигналов используют коэффициент гармоник (K_{Γ}), который характеризует отношение среднеквадратичного значения напряжения возникающих гармонических составляющих к среднеквадратичному значению напряжения основной (первой) гармонической составляющей:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_i^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}. \quad (8.7)$$

Это значение K_{Γ} может изменяться в пределах от нуля до бесконечности, что с практической точки зрения неудобно. Поэтому для оценки нелинейных искажений пользуются коэффициентом нелинейных искажений, представляющим собой отношение среднеквадратичного значения напряжения высших гармонических составляющих к среднеквадратичному значению всего искаженного сигнала:

$$K_{\text{НИ}} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_i^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_i^2 + \dots + U_n^2}}. \quad (8.8)$$

Значения $K_{\text{НИ}}$ изменяются в диапазоне от 0 до 1.

Практически все серийно выпускаемые измерители нелинейных искажений сигналов реализуют метод подавления первой гармоники исследуемого сигнала. Он заключается в раздельном измерении среднеквадратичных значений напряжений искаженного сигнала и высших гармоник, т. е. реализуется измерение $K_{\text{НИ}}$. Упрощенная структурная схема такого измерителя приведена на рисунке 8.3.

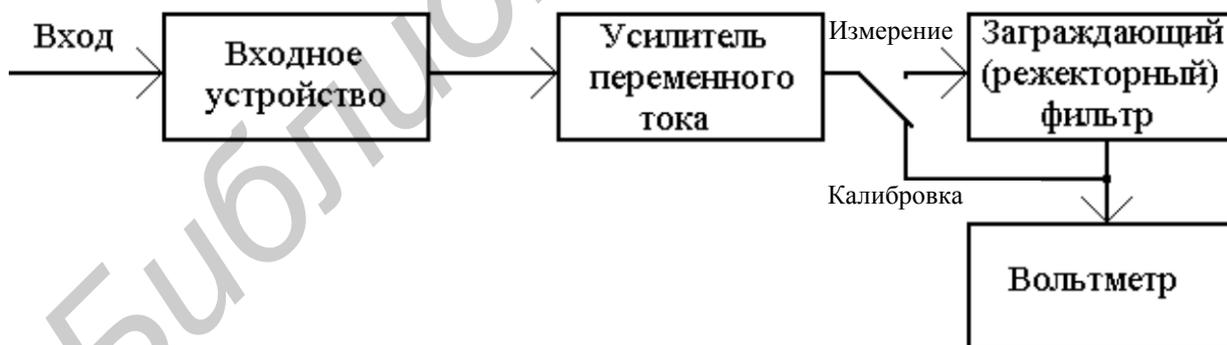


Рисунок 8.3 – Упрощенная структурная схема измерителя коэффициента нелинейных искажений

Вольтметр, показанный на рисунке 8.3, имеет преобразователь (детектор) среднеквадратичного значения напряжения. Входное устройство служит для согласования измерителя с источником исследуемого сигнала. Перед измерением переключатель устанавливается в положение «КАЛИБРОВКА». Регулирует

коэффициент усиления усилителя переменного тока, добиваются максимальных показаний вольтметра, соответствующих 1 (100 %). Показания вольтметра будут соответствовать среднеквадратичному значению напряжения искаженного сигнала:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}.$$

Затем переключатель измерителя устанавливают в положение «ИЗМЕРЕНИЕ». Перегружая заграждающий (режекторный) фильтр в диапазоне частот, подавляют напряжение основной (первой) гармоники искаженного сигнала. Полное подавление основной гармоники будет соответствовать минимальному показанию вольтметра, поскольку первая гармоника имеет наибольшую амплитуду. В этом случае вольтметр покажет среднеквадратичное значение напряжения высших гармонических составляющих сигнала:

$$U_{\text{ни}} = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}.$$

Таким образом, при постоянном значении напряжения всего сигнала согласно (8.8), шкала вольтметра может быть проградуирована непосредственно в значениях $K_{\text{ни}}$.

Основными источниками погрешностей измерения $K_{\text{ни}}$ являются характеристики вольтметра, а также неточность настройки заграждающего (режекторного) фильтра на частоту основной гармоники и компенсации ослабления высших гармоник. Более подробно вопросы измерения нелинейных искажений сигналов освещены в литературе [1–4].

8.2.3 Измерение параметров модуляции широко применяется в радиоэлектронике для исследования амплитудной (АМ), частотной (ЧМ), фазовой (ФМ), импульсной (ИМ) и других видов модуляции. Модуляция – это изменение любого параметра синусоидального модулируемого сигнала по закону модулирующего напряжения. При АМ амплитуда модулируемого сигнала изменяется по закону модулирующего сигнала (кривая 1 на рисунке 8.4).

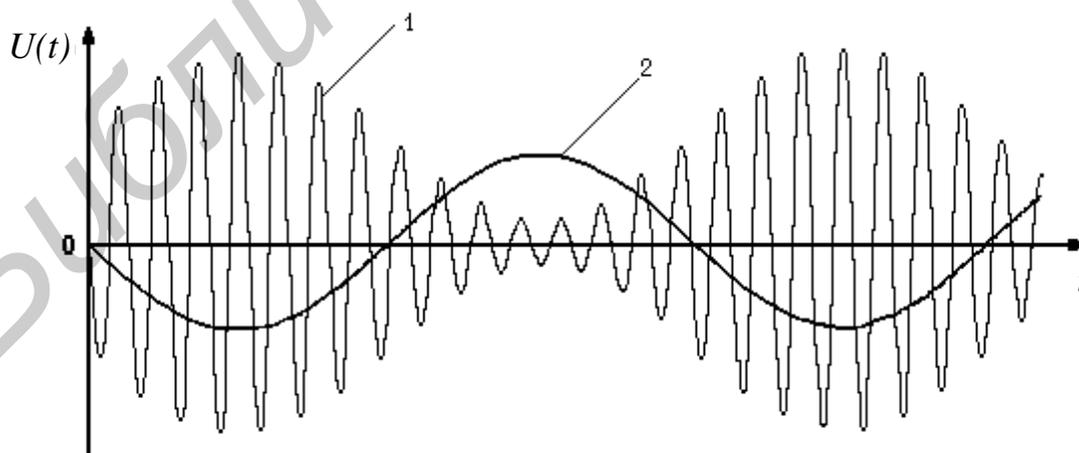


Рисунок 8.4 – Амплитудно-модулированный (кривая 1) и модулирующий (кривая 2) сигналы

АМ сигнал (рисунок 8.5) описывается формулой

$$U(t) = U_m(1 + M \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (8.9)$$

где U_m – амплитуда модулируемого высокочастотного сигнала;

$\omega = 2\pi f$, f – частота модулируемого сигнала;

$\Omega = 2\pi F$, F – частота модулирующего сигнала;

M – коэффициент амплитудной модуляции.

При амплитудной модуляции M и глубина модуляции совпадают и определяются выражением

$$M = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}} \quad (8.10)$$

или

$$M = \frac{\Delta U}{U_m}, \quad (8.11)$$

где ΔU – изменение амплитуды модулированного сигнала.

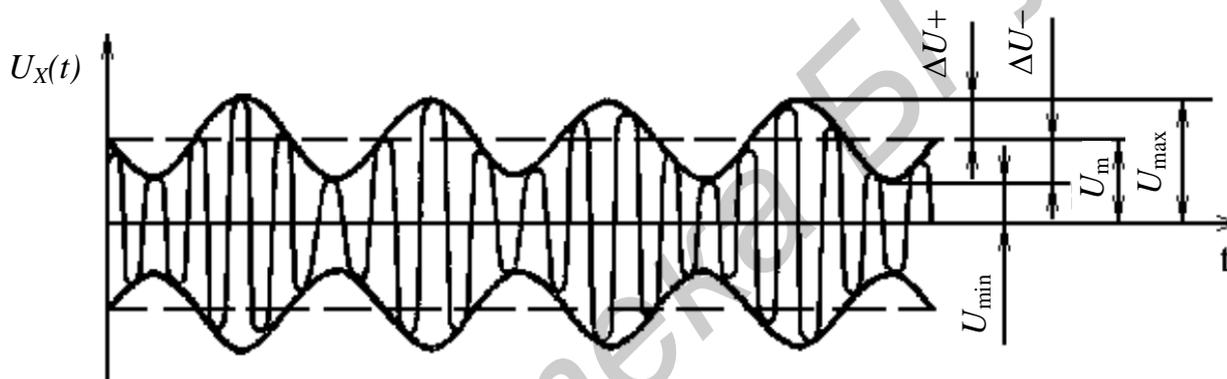


Рисунок 8.5 – Основные параметры АМ сигнала

Формулы (8.10) и (8.11) справедливы только при симметричной модуляции. При несимметричной модуляции M измеряется отдельно: «вверх» – $M_{\text{ВВ}}$ и «вниз» – $M_{\text{ВН}}$:

$$M_{\text{ВВ}} = \frac{\Delta U_+}{U_m} \cdot 100 \% ; \quad (8.12)$$

$$M_{\text{ВН}} = \frac{\Delta U_-}{U_m} \cdot 100 \% , \quad (8.13)$$

где U_m – среднее за период T значение амплитуды модулируемого сигнала.

При ЧМ (рисунок 8.6) изменяется частота модулируемого сигнала.

Сигнал, модулированный по частоте синусоидальным напряжением, записывается в виде

$$U(t) = U_m (\cos \omega_0 t + \beta_f \sin \Omega t), \quad (8.14)$$

где U_m – амплитуда напряжения модулируемого сигнала частотой f_0 ;

$\omega_0 = 2\pi f_0$;

F – частота модулирующего напряжения.

Индекс частотной модуляции β_f определяется выражением

$$\beta_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega} = \frac{\Delta f}{F}, \quad (8.15)$$

где Δf – девиация частоты – отклонение частоты модулированного сигнала от f_0 .

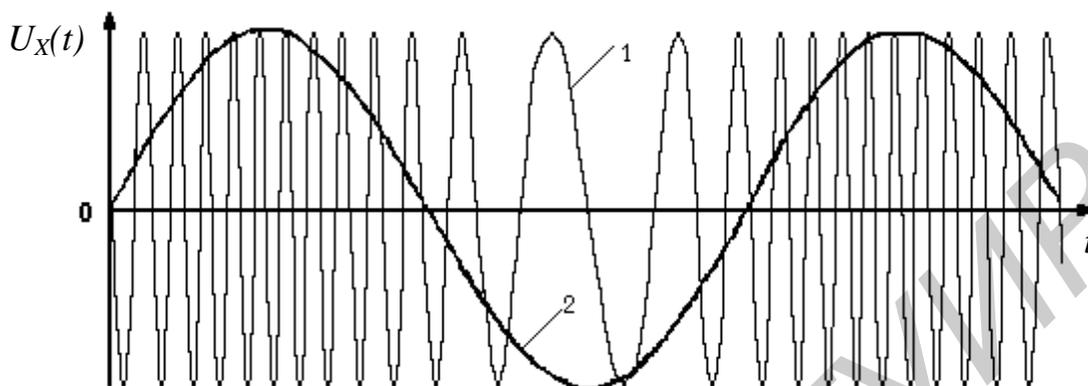


Рисунок 8.6 – Частотно-модулированный (кривая 1) и модулирующий (кривая 2) сигналы

Мгновенное значение частоты частотно-модулированного сигнала $f = f_0 \pm \Delta f$. Девиация частоты пропорциональна амплитуде модулирующего напряжения и не зависит от его частоты:

$$\Delta f = aU_F. \quad (8.16)$$

Упрощенная структурная схема измерителя модуляции (рисунок 8.7) представляет собой измерительный приемник с преобразованием модулируемой частоты входного сигнала в промежуточную частоту. В основе работы таких измерителей лежит метод демодуляции сигнала на промежуточной частоте, в процессе которого выделяется сигнал, соответствующий закону модуляции. Демодуляция (в зависимости от вида сигнала) производится с помощью амплитудных или частотных (фазовых) детекторов.

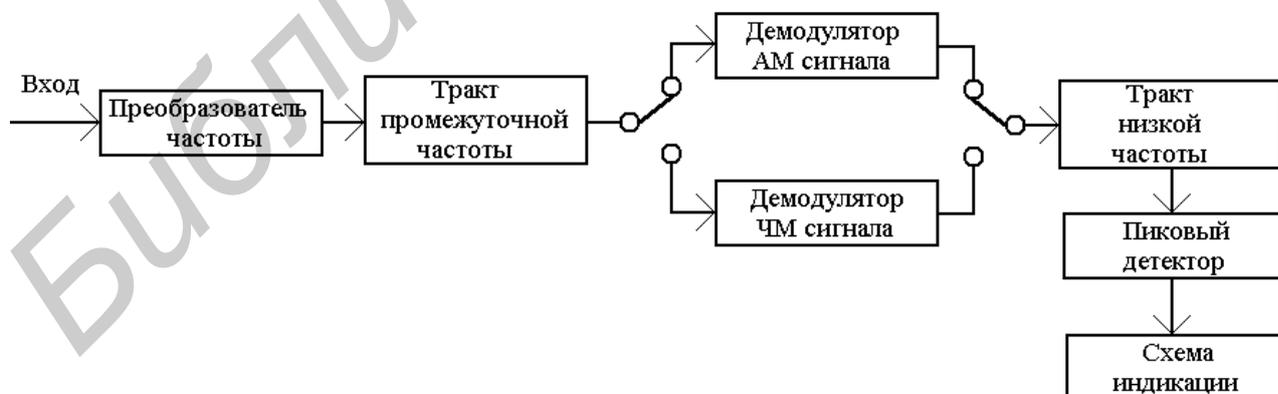


Рисунок 8.7 – Упрощенная структурная схема измерителя параметров АМ и ЧМ

В процессе детектирования модулированного сигнала двумя детекторами, входящими в состав демодулятора, выделяются постоянные напряжения U_m , U_{\min} и U_{\max} . U_m используется для стабилизации уровня модулируемого сигнала, а U_{\min} и U_{\max} после фильтрации измеряются как пиковые напряжения.

Поскольку в процессе демодуляции производилась автоматическая стабилизация уровня несущего сигнала, измеренные пиковые значения U_{\min} и U_{\max} индицируются с помощью масштабного преобразователя непосредственно в единицах коэффициентов модуляции M_B , M_H , M_{CP} , или Δf .

Подробно методы и приборы измерения параметров модулированных сигналов рассмотрены в [1–4].

8.3 Приборы, используемые при выполнении работы

При выполнении лабораторной работы используются приборы:

- анализатор спектра СК4-58 (приложение К);
- измеритель модуляции СК3-43 (приложение Л);
- измеритель нелинейных искажений С6-5 (приложение М);
- генератор сигналов высокочастотный Г4-107 (приложение Н);
- осциллограф электронный С1-68.

8.4 Описание лабораторного макета

Лабораторные макеты М1 и М2 представляют собой источники исследуемых сигналов, используемые при измерении коэффициента нелинейных искажений и параметров спектра сигналов. В состав макетов входят один задающий генератор импульсных сигналов прямоугольной формы с изменяющейся частотой повторения импульсов (для наблюдения спектрограмм и измерения параметров спектра сигналов) и набор полосовых фильтров различной добротности для выделения первой гармоники импульсных сигналов. Изменение частоты повторения и длительности импульсных сигналов, а также полосы пропускания полосовых фильтров осуществляется с помощью переключателя «ВАРИАНТ».

Вид лицевых панелей макетов М1 и М2 представлен на рисунке 8.8.

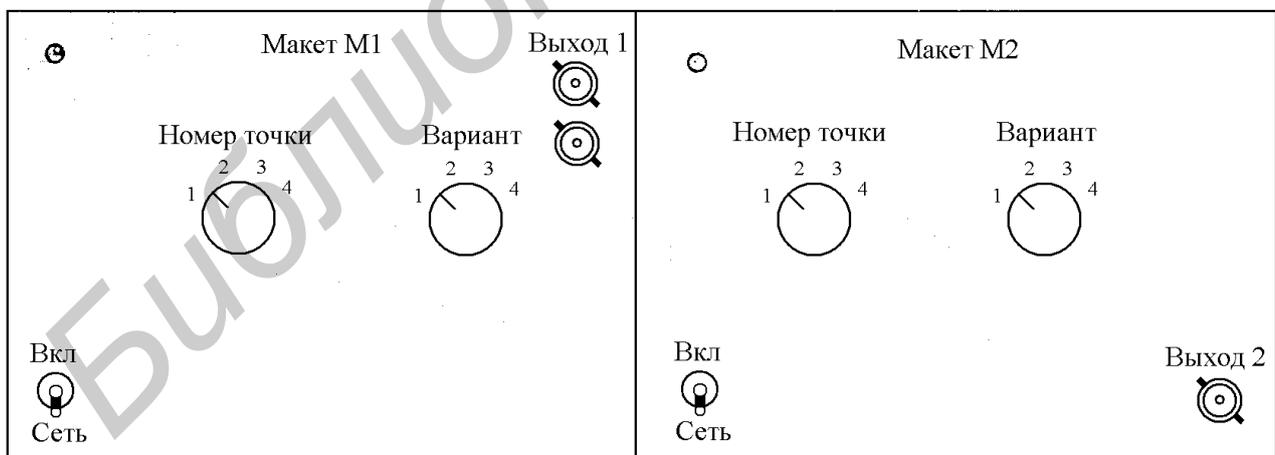


Рисунок 8.8 – Внешний вид передних панелей макетов М1 и М2

8.5 Подготовка к выполнению работы

8.5.1 По рекомендуемой литературе детально изучить методы измерения параметров амплитудно- и частотно-модулированных сигналов, нелинейных

искажений и анализа спектра сигналов.

8.5.2 По приложениям К–Н изучить устройство, принцип действия и работу приборов СК4-58, СК3-43, С6-5 и Г4-107, а также методику проведения измерений с их помощью и оценки погрешностей полученных результатов.

8.5.3 Сделать заготовку отчета (одну на бригаду) по лабораторной работе в соответствии с требованиями раздела «Содержание отчета» данного учебно-методического пособия.

8.5.4 Ответить на контрольные вопросы.

8.5.5 Выполнить домашнее задание, решив задачу, условие которой приведено ниже, и включить его в заготовку отчета.

Гармонический сигнал частотой 1 МГц и амплитудой U_m был промодулирован синусоидальным сигналом, значения частоты F и амплитуды U которого приведены в таблице 8.1. Определить коэффициент амплитудной модуляции, девиацию частоты и индекс частотной модуляции, если известно, что частота выходного сигнала частотного модулятора определяется следующей функциональной зависимостью $F_{\text{мод}} = (10U + 0,01F)$ кГц, где U – амплитуда модулирующего сигнала, В; F – частота модулирующего сигнала, кГц. Значения величины U_m для каждого варианта приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1

| Параметр | Вариант | | | | | | | | | |
|-----------------|---------|-----|------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| $U_m, \text{В}$ | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 4 |
| $F, \text{кГц}$ | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| $U, \text{В}$ | 0,9 | 0,4 | 0,21 | 0,54 | 0,5 | 0,1 | 0,06 | 0,2 | 0,1 | 0,8 |

8.6 Задания к лабораторной работе

8.6.1 Провести анализ спектра сигналов и измерение их спектральных характеристик.

8.6.2 Провести измерение коэффициента нелинейных искажений сигналов.

8.6.3 Провести измерение параметров амплитудно- и частотно-модулированных сигналов.

8.7 Порядок выполнения работы

8.7.1 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 8.6.1 задания к лабораторной работе.

8.7.1.1 Подготовить к проведению измерений анализатор спектра СК4–58 согласно разделу К.4 приложения К.

8.7.1.2 Переключателем «ВАРИАНТ» макета М1 установить номер варианта в соответствии с номером бригады (таблица 8.2).

Таблица 8.2

| | | | | | | | | | | |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| Номер бригады | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Номер варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 |

8.7.1.3 Переключатель «ДИАПАЗОН кГц» установить в положение, соответствующее частоте основной гармоники анализируемого сигнала (таблица 8.3). Вращением ручки «МЕТКА» установить яркостную метку на экране ЭЛТ в центр экрана. Установить переключатель «НОМЕР ТОЧКИ» в положение 1.

Таблица 8.3

| Параметры | Значение параметра | | | |
|---------------------------------|--------------------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Частота основной гармоники, кГц | 240 | 200 | 150 | 100 |

8.7.1.4 Руководствуясь методикой, изложенной в разделе К.5 приложения К, получить спектр исследуемого сигнала на экране ЭЛТ анализатора спектра СК4-58. Осциллограмму исследуемого сигнала наблюдать на экране осциллографа С1-78. Вид исследуемого сигнала и его спектрограмму привести в отчете по лабораторной работе.

8.7.1.5 Руководствуясь методикой, изложенной в подразделе К.5.2 приложения К, провести измерение:

f_0 – частоты основной гармоники спектра;

$f_{\text{В}}$ – частоты верхней боковой составляющей спектра;

$f_{\text{Н}}$ – частоты нижней боковой составляющей спектра.

Определите ширину спектра.

Результаты измерений и расчета занесите в таблицу 8.4.

8.7.1.6 Руководствуясь методикой, изложенной в подразделе К.5.3 приложения К, провести измерение относительных амплитуд $U_{\text{В}}$ и $U_{\text{Н}}$ спектральных составляющих по отношению к основной.

Показания аттенуаторов A_0 , a_0 , $A_{\text{Н}}$, $a_{\text{Н}}$, $A_{\text{В}}$, $a_{\text{В}}$ и полученные значения $U_{\text{В}}$ и $U_{\text{Н}}$ занесите в таблицу 8.4.

8.7.1.7 Повторить измерения по подпунктам 8.7.1.4–8.7.1.6 для остальных точек (2–4).

8.7.1.8 Пользуясь техническими характеристиками анализатора спектра СК4-58, определить инструментальные погрешности измерения амплитуды и частотных параметров спектров сигналов. Результаты расчетов занести в таблицу 8.4.

8.7.2 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 8.6.2 задания к лабораторной работе.

8.7.2.1 Подготовить к проведению измерений прибор С6-5 согласно разделу М.4 приложения М.

Таблица 8.4

| Параметры | Номер сигнала (положение переключателя) | | | | Погрешность измерений | | | |
|---|--|---|---|---|-----------------------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| f_0 , кГц | | | | | | | | |
| f_H , кГц | | | | | | | | |
| f_B , кГц | | | | | | | | |
| $(f_B - f_H)$, кГц | | | | | | | | |
| Показания ступенчатого аттенюатора A_0 , дБ | | | | | | | | |
| Показания плавного аттенюатора a_0 | | | | | | | | |
| Показания ступенчатого аттенюатора A_H , дБ | | | | | | | | |
| Показания плавного аттенюатора a_H | | | | | | | | |
| U_B , дБ | | | | | | | | |
| U_H , дБ | | | | | | | | |

8.7.2.2 Переключателем «ВАРИАНТ» макета М2 установить номер варианта в соответствии с номером бригады согласно таблице 8.2.

8.7.2.3 Руководствуясь методикой, изложенной в разделе М.5 приложения М, измерить коэффициент нелинейных искажений сигналов для четырех положений переключателя «НОМЕР ТОЧКИ» макета М2. Результаты измерений занесите в таблицу 8.5.

Таблица 8.5

| Параметры | Номер сигнала (положение переключателя «НОМЕР ТОЧКИ») | | | |
|--------------------------------|--|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $K_{НИ}$, % | | | | |
| Погрешность измерения $K_{НИ}$ | | | | |
| $K_{НИ}$, дБ | | | | |
| Погрешность измерения $K_{НИ}$ | | | | |

8.7.2.4 Пользуясь техническими характеристиками прибора Сб-5, определить инструментальные погрешности измерения коэффициентов нелинейных искажений сигналов. Результаты расчетов занести в таблицу 8.5.

8.7.3 Выполнить измерения в соответствии с пунктом 8.6.3 задания к лабораторной работе.

8.7.3.1 Подготовить к проведению измерений измеритель модуляции СКЗ-43 и высокочастотный генератор сигналов Г4-107 согласно разделам Л.4 и Н.4 приложений Л и Н.

8.7.3.2 Генератор Г4-107 установить в режим внутренней амплитудной модуляции, а прибор СКЗ-43 – в режим измерения амплитудной модуляции. Установить органы управления генератора Г4-107 в положения, соответствующие первой частотной точке (таблица 8.6).

Таблица 8.6

| Номер варианта (n – номер бригады) | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Частота по шкале генератора Г4-107, МГц |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| Положение переключателя «Глубина МОД %» | АМ | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 10 | 50 | 60 | 10 | $110 + 2n$ |
| | | 30 | 40 | 50 | 40 | 50 | 20 | 60 | 70 | 20 | $82 + 1n$ |
| | | 50 | 50 | 70 | 70 | 80 | 30 | 70 | 80 | 40 | $160 + 4n$ |
| | | 70 | 80 | 90 | 80 | 90 | 40 | 80 | 90 | 60 | $50 + 3n$ |
| генератора Г4-107 при работе в режимах: | ЧМ | 20 | 30 | 40 | 50 | 20 | 30 | 40 | 50 | 20 | $120 + 5n$ |
| | | 60 | 70 | 80 | 90 | 40 | 70 | 80 | 90 | 60 | $67 + 7n$ |
| | | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 | 10 | 20 | 30 | $170 + n$ |
| | | 60 | 70 | 80 | 90 | 60 | 70 | 80 | 90 | 60 | $60 + 3n$ |

8.7.3.3 Руководствуясь методикой, изложенной в подразделе Л.5.2 приложения Л, измерить коэффициент амплитудной модуляции исследуемого сигнала. Результаты измерений занести в таблицу 8.7.

8.7.3.4 Повторить измерения коэффициента АМ для остальных частотных точек (таблица 8.6).

8.7.3.5 Перевести генератор Г4-107 в режим внутренней частотной модуляции, а прибор СКЗ-43 – в режим измерения девиации частоты. Установить органы управления генератора Г4-107 в положения, соответствующие первой частотной точке (см. таблицу 8.6).

8.7.3.6 Руководствуясь методикой подраздела Л.5.1 приложения Л, измерить значение девиации частоты частотно-модулированного сигнала. Результаты измерений занести в таблицу 8.7.

8.7.3.7 Повторить измерения девиации частоты для остальных частотных точек, указанных в таблице 8.6.

8.7.3.8 На основании результатов измерений девиации частоты рассчитать по формуле (8.15) значение индекса частотной модуляции. Результаты расчетов занести в таблицу 8.7.

8.7.3.9 Пользуясь техническими характеристиками измерителя модуляции СКЗ-43, определить инструментальные погрешности измерения коэффициентов АМ и девиации частоты. Рассчитать, пользуясь выражением (8.17), погрешность измерения индекса частотной модуляции как погрешность косвенного измерения. Результаты расчетов занести в таблицу 8.7.

$$\Delta_{\beta} = \sqrt{\left(\frac{d\beta}{d(\Delta f)}\right)^2 \cdot \Delta(\Delta f)^2 + \left(\frac{d\beta}{dF}\right)^2 \cdot \Delta F^2}, \quad (8.17)$$

где $\Delta(\Delta f)$ – погрешность измерения девиации частоты;

ΔF – погрешность установки частоты модулирующего сигнала по шкале генератора Г4-107.

8.7.3.10 Определить погрешность градуировки шкалы переключателя глубины АМ генератора Г4-107, считая показания прибора СКЗ-43 действительными значениями коэффициента АМ. Результаты расчетов занести в таблицу 8.7.

Таблица 8.7

| Параметры | Положение переключателя «Глубина МОД %» генератора Г4-107 при измерении КАМ | | | |
|---|--|--|--|--|
| | | | | |
| M_+ , % | | | | |
| M_- , % | | | | |
| Погрешность градуировки переключателя «Глубина МОД %» | | | | |
| Погрешность измерения КАМ | | | | |
| Параметры | Положение переключателя «Глубина МОД %» генератора Г4-107 при измерении девиации | | | |
| | | | | |
| Δf_+ , кГц | | | | |
| Δf_- , кГц | | | | |
| β | | | | |
| Погрешность измерения девиации частоты | | | | |
| Погрешность измерения, β | | | | |

8.8 Контрольные вопросы

1 Чем обусловлена необходимость исследования спектра сигналов? Дайте определение термину «спектр».

2 Какие существуют методы и способы анализа спектра сигналов? Перечислите их и дайте краткую сравнительную характеристику.

3 Чем достигается автоматизация анализа спектра сигналов?

4 Какой метод анализа спектра сигналов положен в основу работы анализатора спектра СК4-58? В чем заключается сущность данного метода?

5 Каким образом осуществляется измерение амплитудных и частотных параметров спектра сигналов прибором СК4-58?

6 Назовите основные источники погрешностей измерения амплитудных и

частотных параметров спектра. Предложите пути их уменьшения или полного исключения.

7 Каково назначение генераторов ВЧ диапазона, какими основными параметрами характеризуются их выходные сигналы?

8 КАМ амплитудно-модулированных сигналов определяется как

$$1) \quad M = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}};$$

$$3) \quad M = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\max} - U_{\min}};$$

$$2) \quad M = \frac{\Delta U_{\max}}{U_m};$$

$$4) \quad M = \frac{U_{\min}}{\Delta U_{\min}}.$$

Укажите правильный ответ.

9 Перечислите методы измерения коэффициента амплитудной модуляции. Дайте их определение.

10 Какой метод измерения коэффициента амплитудной модуляции положен в основу работы прибора СКЗ-43?

11 Укажите основные источники погрешностей измерения коэффициента амплитудной модуляции. Укажите пути их уменьшения.

12 Девиация частоты частотно-модулированных сигналов определяется как:

а) минимальное значение частоты модулирующего сигнала;

б) максимальное значение частоты модулирующего сигнала;

в) максимальное отклонение частоты модулированного сигнала от среднего значения частоты;

г) минимальное отклонение частоты модулированного сигнала от максимального значения частоты модулирующего сигнала.

Укажите правильный ответ.

13 Индекс частотной модуляции определяется как: а) отношение частоты модулирующего сигнала к частоте модулируемого сигнала; б) отношение частоты модулируемого сигнала к частоте модулирующего сигнала; в) отношение максимального значения частоты к минимальному значению частоты модулируемого сигнала; г) отношение девиации частоты к частоте модулируемого сигнала. Укажите правильный ответ.

14 Какие методы измерения девиации частоты используются в приборах для измерения параметров модулированных сигналов?

15 Какой метод измерения девиации частоты применен в приборе СКЗ-43? В чем сущность данного метода?

16 Использование каких методов измерения коэффициента амплитудной модуляции и девиации частоты дало возможность объединить измерение указанных параметров в одном измерительном приборе СКЗ-43?

17 Укажите основные источники возникновения погрешности измерения девиации частоты. Оцените результирующую погрешность измерения девиации частоты прибором СКЗ-43.

18 Коэффициент гармоник, используемый для оценки нелинейных искажений сигналов, определяется как:

а) отношение среднего значения искаженного сигнала к среднему значению первой гармоники;

б) отношение среднеквадратичного значения высших гармоник к среднеквадратичному значению первой гармоники;

в) отношение пикового значения высших гармоник к пиковому значению всего сигнала;

г) отношение среднеквадратичного значения искаженного сигнала к среднеквадратичному значению высших гармоник.

Укажите правильный ответ.

19 Почему при измерении нелинейных искажений сигналов вместо измерения коэффициента K_T переходят к измерению $K_{ни}$?

20 Перечислите методы измерения коэффициента гармоник. Охарактеризуйте каждый из них.

21 Какой метод измерения коэффициента гармоник положен в основу работы прибора С6-5?

22 Каковы причины возникновения погрешностей измерения коэффициента нелинейных искажений в приборе С6-5?

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе оформляется на стандартных листах бумаги формата А4. Правила оформления отчета приведены в стандарте БГУИР СТП 01–2013 «Дипломные проекты (работы). Общие требования».

Отчет должен содержать титульный лист и основной текст: цель работы, лабораторное задание, средства измерений, используемые при выполнении работы (в форме таблицы 9.1), структурные схемы приборов, условие задачи из подраздела «Подготовка к выполнению работы» и ход ее решения, результаты эксперимента и расчетов (в форме таблиц), расчетные формулы и выводы по каждому пункту исследований.

Таблица 9.1

| Наименование прибора | Тип прибора | Заводской номер | Основные характеристики |
|----------------------|-------------|-----------------|-------------------------|
| | | | |

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ВАТТМЕТР ПОГЛОЩАЕМОЙ МОЩНОСТИ ИМПУЛЬСНЫЙ МЗ-41

А.1 Назначение

Ваттметр МЗ-41 предназначен для измерения пиковой мощности импульсно-модулированных колебаний СВЧ и непрерывной мощности СВЧ в волноводных трактах сечением 23×10 мм в диапазоне частот 8,24–12,05 ГГц. Он состоит из приемного преобразователя и индикаторного блока Я2М-69.

А.2 Технические и метрологические характеристики

А.2.1 Диапазон измеряемой импульсной мощности 100 мкВт–100 мВт; диапазон измеряемой непрерывной мощности 10 мкВт–100 мВт.

А.2.2 Основная погрешность ваттметра без учета погрешности рассогласования при измерении мощности не превышает:

± 10 % при измерении мощности СВЧ до 1 мВт;

± 15 % при измерении мощности СВЧ от 1 до 10 мВт (с подключенным к входу приемного преобразователя фиксированного аттенюатора ослаблением 10 дБ).

А.2.3 КСВН на входе ваттметра не превышает 1,4.

А.2.4 Время установления показаний ваттметра не превышает 10 с.

А.2.5 Ваттметр обеспечивает метрологические характеристики после времени самопрогрева в течение 30 мин.

А.3 Устройство и принцип работы

В ваттметре реализован метод преобразования СВЧ мощности в напряжение, пропорциональное мощности, с последующим измерением напряжения. Этот метод реализуется с помощью полупроводникового преобразователя, в котором используется эффект преобразования мощности СВЧ в термоЭДС «горячих» носителей тока в точечном контакте металл – полупроводник.

Структурная схема ваттметра приведена на рисунке А.1 и состоит из приемного преобразователя и индикаторного блока. Индикаторный блок содержит следующие основные функциональные узлы: схему коммутации, каналы измерения импульсной и непрерывно генерируемой мощности (НГ), индикаторный прибор (ИП).

Мощность СВЧ поступает на приемный преобразователь, который подключается к исследуемому волноводному тракту и соединяется со схемой коммутации индикаторного блока при помощи кабеля. Для увеличения динамического диапазона подключение приемного преобразователя к волноводному тракту при измерении мощности от 1 до 100 мВт осуществляется через фиксированный аттенюатор ослаблением 10 или 20 дБ. На выходе приемного преобразователя под действием СВЧ мощности выделяется или постоянное напряжение, или последовательность видеоимпульсов в зависимости от характера СВЧ сигнала.

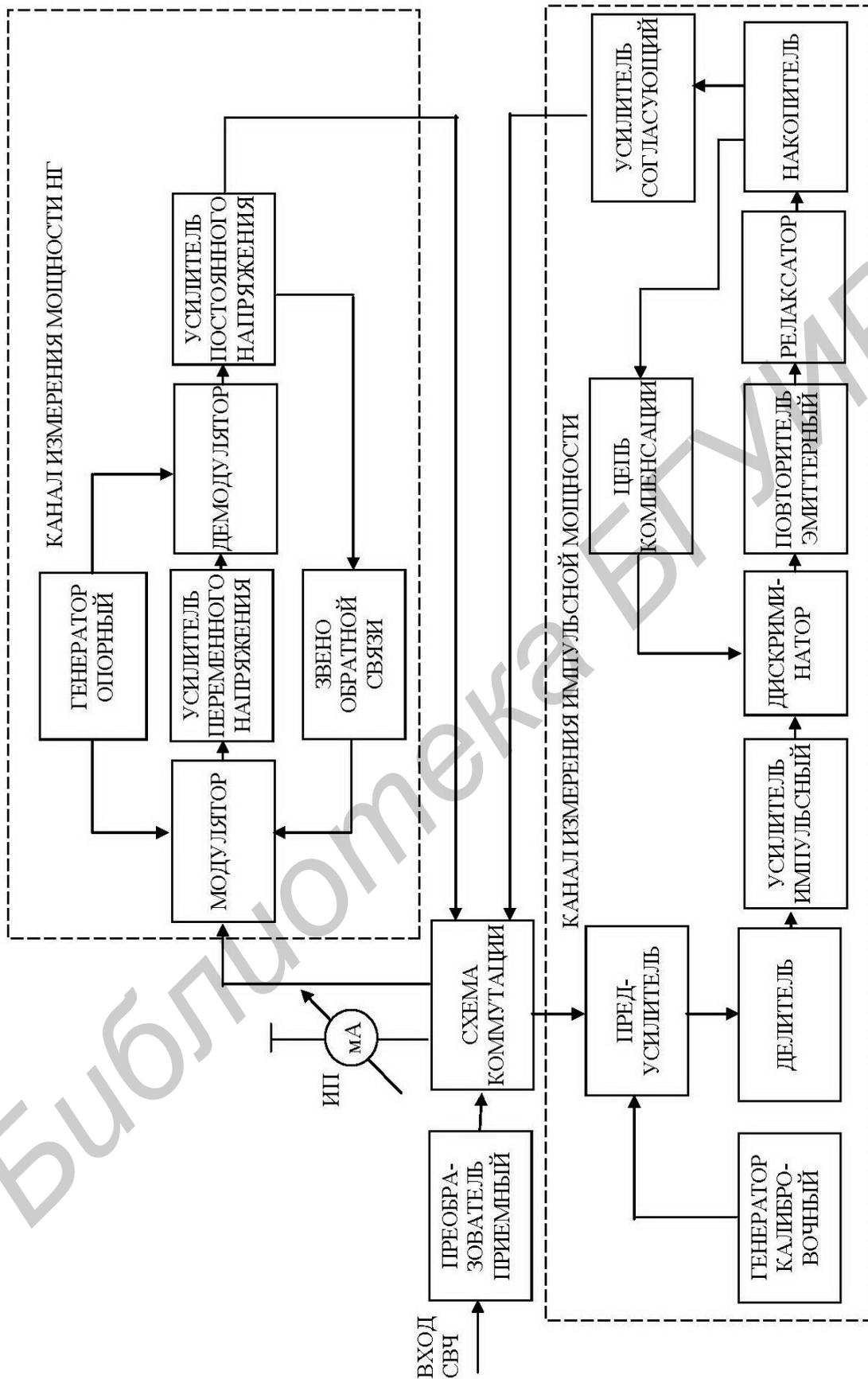


Рисунок А.1

Это напряжение поступает на вход схемы коммутации индикаторного блока, в котором осуществляется его преобразование и регистрация ИП.

При измерении НГ мощности постоянное напряжение через схему коммутации подается на канал измерения НГ мощности. Канал представляет собой усилитель типа модулятор-демодулятор (МДМ). Постоянное напряжение поступает на модулятор, в котором происходит его преобразование в сигнал типа «меандр». Далее сигнал усиливается усилителем переменного напряжения и подается на демодулятор. Модулятор и демодулятор управляются синхронно опорным генератором. Постоянное напряжение, снимаемое с демодулятора, усиливается усилителем постоянного напряжения и поступает на микроамперметр. Весь усилитель МДМ охвачен глубокой отрицательной обратной связью при помощи цепи обратной связи.

При измерении импульсной мощности последовательность видеоимпульсов через схему коммутации поступает на канал измерения импульсной мощности. Последовательность видеоимпульсов усиливается предварительным усилителем и поступает на делитель, который служит для переключения пределов измерения. Затем сигнал поступает на импульсный усилитель, который увеличивает амплитуду импульсов. Преобразование этих импульсов происходит в автокомпенсационном пиковом детекторе с релаксатором в цепи автокомпенсации.

Дискриминатор служит для сравнения импульсного и постоянного напряжений. Импульс с выхода дискриминатора (он возникает всегда, когда амплитуда импульсов на входе дискриминатора превышает величину постоянного запирающего напряжения на дискриминаторе) через эмиттерный повторитель поступает на релаксатор.

Релаксатор вырабатывает нормированные по длительности и амплитуде импульсы, которые воздействуют на накопитель. Накопитель служит для получения постоянного напряжения, которое через цепь компенсации подается в качестве запирающего на дискриминатор. Через согласующий усилитель это напряжение поступает на ИП.

Калибровочный генератор генерирует стабильное по амплитуде напряжение типа «меандр», которое используется для калибровки импульсного канала. Внешний вид индикаторного блока ваттметра представлен на рисунке А.2.

А.4 Подготовка прибора к работе

А.4.1 Перед началом работы с прибором необходимо ознакомиться с принципом его работы, а по надписям на лицевой панели – с назначением органов управления.

А.4.2 Установить органы управления на лицевой панели в следующие положения:

- тумблер «СЕТЬ» – в нижнее положение;
- потенциометр «КАЛИБРОВКА» – в крайнее левое;

– переключатель рода работы – в положение « \square » или «НГ» в зависимости от характера измеряемой мощности;

– потенциометр « $\blacktriangleright 0 \blacktriangleleft$ » – в среднее положение;

– переключатель «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ» – в положение «1000».

А.4.3 Тумблер «СЕТЬ» перевести в верхнее положение, при этом должна загореться сигнальная лампочка на лицевой панели прибора.

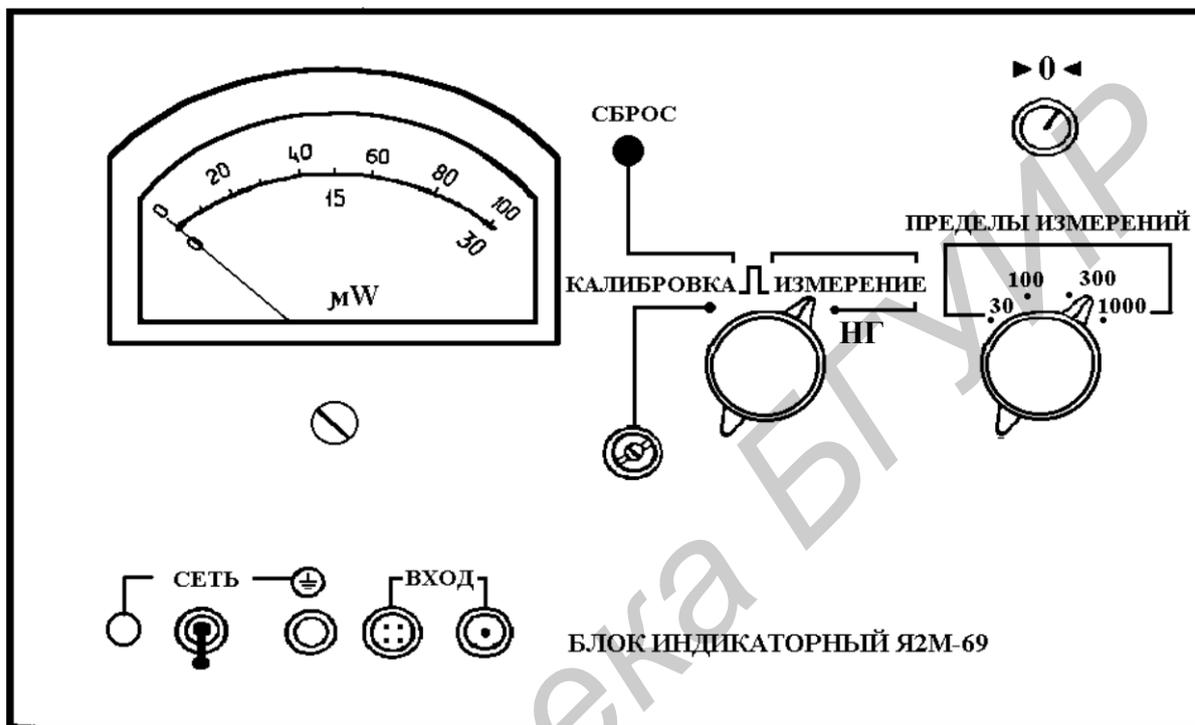


Рисунок А.2 – Внешний вид индикаторного блока Я2М-69

А.5 Проведение измерений с прибором

А.5.1 До подключения приемного преобразователя к исследуемому объекту установить стрелку ИП ваттметра на нулевую отметку шкалы и при необходимости скорректировать потенциометром « $\blacktriangleright 0 \blacktriangleleft$ »; откалибровать ваттметр в режиме измерения импульсно-модулированных колебаний, для чего установить:

– переключатель рода работы в положение « \square »;

– переключатель «ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕРЕНИЯ» в положение «1000»;

– стрелку ИП на нуль при помощи ручки « $\blacktriangleright 0 \blacktriangleleft$ » при нажатой кнопке «СБРОС»;

– переключатель рода работы в положение «КАЛИБРОВКА»;

– отклонение стрелки ИП на всю шкалу с помощью потенциометра «КАЛИБРОВКА»;

– переключатель рода работы в положение «НГ».

А.5.2 Подключить приемный преобразователь к исследуемому объекту и произвести отсчет показаний.

Внимание! При уровне мощности СВЧ более 1 мВт пользуйтесь фиксированным аттенуатором.

А.5.3 Определить уровень измеряемой мощности умножением индицируемого значения на поправочный частотный коэффициент для выбранной частоты, значения которого указаны в таблице А.1.

Таблица А.1

| Коэффициент | Частота сигнала генератора, ГГц | | | | | | | | |
|-------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| | 8,24 | 8,5 | 9,0 | 9,5 | 10,0 | 10,5 | 11,0 | 11,5 | 12,05 |
| K_1 | 0,93 | 0,93 | 1,16 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 1,01 | 1,04 | 1,04 |
| K_2 | 12,5 | 12,5 | 16,4 | 14,7 | 14,3 | 13,5 | 13,3 | 13,2 | 13,2 |

Примечание – K_1 – для приемного преобразователя без фиксированного аттенуатора; K_2 – с фиксированным аттенуатором ослаблением 10 дБ.

А.5.4 Погрешность рассогласования ($\delta_{РАС}$) ваттметра при работе следует определить по формуле

$$\delta_{РАС} = \pm 2 |100 \frac{\%}{\Gamma}|,$$

где $|\Gamma_{Г}|$ – модуль коэффициента отражения выхода источника (волноводного тракта, в котором измеряется мощность);

$|\Gamma_{В}|$ – модуль коэффициента отражения входа ваттметра.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное)

ВАТТМЕТР ПОГЛОЩАЕМОЙ МОЩНОСТИ МЗ-51

Б.1 Назначение

Ваттметр поглощаемой мощности МЗ-51 предназначен для измерения мощности синусоидальных СВЧ сигналов и среднего значения мощности импульсно-модулированных СВЧ сигналов. Он состоит из измерительного блока Я2М-66 с цифровым индикатором и измерительного термоэлектрического преобразователя.

Б.2 Технические и метрологические характеристики

Б.2.1 Диапазон частот 0,02–17,85 ГГц; с коаксиально-волноводным переходом 5.433.022 – 8,24–12,05 ГГц.

Б.2.2 Пределы измерения мощности синусоидальных СВЧ сигналов и среднего значения мощности импульсно-модулированных сигналов 10^{-6} – 10^{-2} Вт. Конечные значения пределов 0,3–3–10 мВт.

Б.2.3 Основная погрешность ваттметра без учета рассогласования и дополнительных переходов не превышает значения

$$\delta = \pm \left[4 + 0,1 \left(\frac{P_K}{P_X} - 1 \right) \right], \% .$$

При работе с переходом 5.433.022 в диапазоне частот 8,24–12,05 ГГц погрешность ваттметра не превышает значения

$$\delta = \pm \left[10 + 0,1 \left(\frac{P_K}{P_X} - 1 \right) \right], \% ,$$

где P_K – конечное значение установленного предела измерений;

P_X – показания ваттметра.

Б.2.4 Коэффициент стоячей волны измерительного преобразователя 1,3; с переходом 5.433.022 – 1,6.

Б.2.5 Коэффициент эффективности $K_{\text{э}} = 0,98 \pm 0,03$.

Б.2.6 Время самопрогрева ваттметра 30 мин.

Б.3 Устройство и принцип работы

В основу работы ваттметра положен принцип преобразования СВЧ мощности в тепловой вид энергии и измерения образуемой на выходе измерительного преобразователя напряжения термоЭДС, которая пропорциональна подведенной к нему мощности СВЧ.

Преобразование СВЧ мощности происходит непосредственно в нитевидных термопарах, которые представляют собой СВЧ согласованную нагрузку, включенную на конце отрезка передающего тракта преобразователя.

Электрическая принципиальная схема термоэлектрического преобразователя приведена на рисунке Б.1.

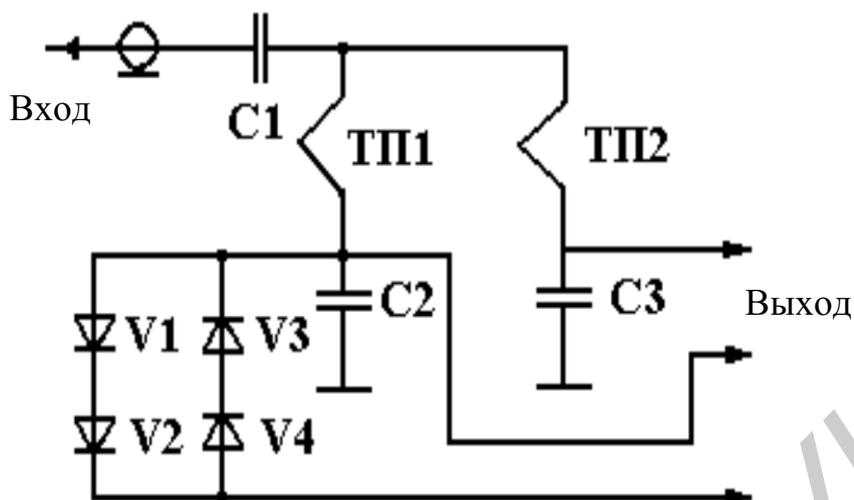


Рисунок Б.1 – Схема электрическая принципиальная термоэлектрического преобразователя

СВЧ сигнал со входа преобразователя через конденсатор С1, смонтированный на конце внутреннего проводника отрезка коаксиальной линии, поступает непосредственно на две последовательно соединенные между собой нитевидные термопары ТП1 и ТП2, где он рассеивается. Напряжение термоЭДС, образуемое в результате нагрева термопар, подается на выход преобразователя. Для исключения взаимного влияния цепи переменного тока высокой частоты и цепи постоянного тока в преобразователе установлены конденсаторы С2 и С3. Диоды V1–V4 защищают термопары от прямого воздействия паразитных сигналов, возникающих при различных переходных процессах в приборах.

Работа блока Я2М-66 основана на принципе усиления и преобразования в цифровую форму напряжения постоянного тока, поступающего с термоэлектрического преобразователя. Структурная схема Я2М-66 приведена на рисунке Б.2.

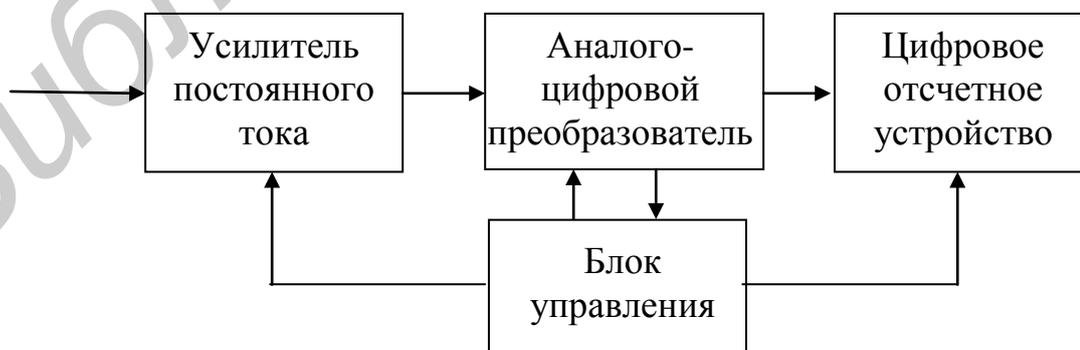


Рисунок Б.2 – Структурная схема блока Я2М-66

Сигнал с выхода СВЧ преобразователя поступает на вход усилителя постоянного тока (УПТ), выполненного по схеме с преобразованием. Напряжение постоянного тока с выхода УПТ поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), выполненного по схеме двойного интегрирования и преобразующего измеряемое напряжение в пропорциональный его значению интервал времени, который заполняется импульсами калиброванной частоты, количество которых затем подсчитывается счетчиком цифрового отсчетного устройства. После преобразования в десятичную систему счисления результат измерения воспроизводится на цифровом индикаторе. Блок управления предназначен для автоматического или дистанционного выбора пределов в зависимости от уровня измеряемого сигнала, выбора масштаба в зависимости от типа выбранного преобразователя и определения размерности в зависимости от типа преобразователя и уровня его сигнала.

Переключение пределов измерения осуществляется за счет изменения коэффициента передачи УПТ.

Внешний вид блока Я2М-66 представлен на рисунке Б.3.

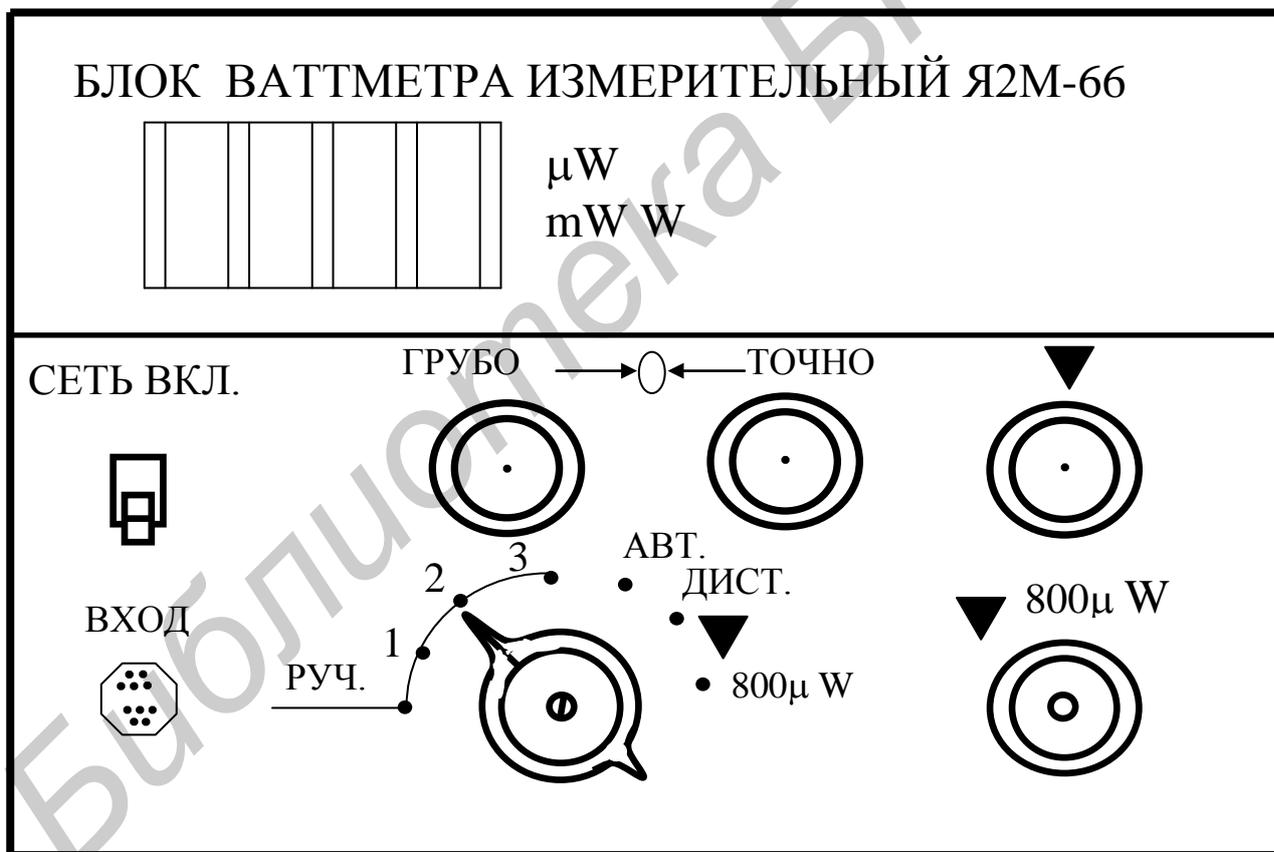


Рисунок Б.3 – Внешний вид блока Я2М-66

Б.4 Подготовка прибора к работе

Б.4.1 Перед началом работы изучить принцип действия ваттметра МЗ-51 и ознакомиться с расположением и назначением органов управления и контроля на передней панели блока Я2М-66.

Б.4.2 Присоединить к измерительному блоку преобразователь СВЧ мощности.

Б.4.3 Установить переключатель режима работы в положение «АВТ.».

Б.4.4 Тумблер «СЕТЬ ВКЛ.» установить в верхнее положение. При этом должны загореться цифры на табло и лампочка подсвета предела измерений.

Б.4.5 Через 30 мин установить «нуль» на цифровом табло, поворачивая последовательно ручки потенциометров «ГРУБО →0 ←ТОЧНО».

Б.4.6 Перевести переключатель режима работы в положение «800 μW» и произвести калибровку измерительного блока, для чего, поворачивая ручку потенциометра «▼ 800 μW», установить на табло показание «800 μW».

Б.5 Проведение измерений с прибором

Б.5.1. Ваттметр обеспечивает измерение мощности в следующих режимах:

– ручное переключение пределов измерений (положение переключателя режимы работы – «РУЧ.1», «РУЧ.2», «РУЧ.3»; им соответствуют конечные значения пределов измерения 300 мкВт, 3 мВт, 10 мВт);

– автоматическое переключение пределов (положение переключателя режимы работы – «АВТ.»).

Б.5.2 Для проведения измерений в режиме ручного переключения пределов переключатель режима работы установить в положение «РУЧ.3». Затем подсоединить преобразователь к выходу источника СВЧ мощности и спустя несколько секунд отсчитать показания цифрового индикатора.

Если показания цифрового индикатора менее 0,1 от конечного значения выбранного предела измерений, переключатель режима работы переведите в положение, соответствующее более низкому пределу измерений.

Определить значение измеряемой мощности по формуле

$$P_{\text{ИЗМ}} = \frac{P_x}{K_{\text{Э}} (1 - |\Gamma_{\text{ПР}}|^2)},$$

где P_x – показание цифрового индикатора;

$K_{\text{Э}}$ – коэффициент эффективности;

$\Gamma_{\text{ПР}}$ – модуль коэффициента отражения преобразователя.

Определить погрешность рассогласования по формуле

$$\Delta_{\text{РАС}} \Gamma = \pm 2 \left| \frac{\Delta \Gamma_{\text{ПР}}}{\Gamma_{\text{ПР}}} \right|;$$

где $\Gamma_{\text{Г}}$ – модуль коэффициента отражения выхода генератора СВЧ.

Б.5.3 Для проведения измерений в режиме автоматического переключения пределов установить переключатель режима работы в положение «АВТ.». Определить значения измеряемой мощности и погрешности рассогласования по формулам подраздела Б.5.2.

ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное)

ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ Г4-109

В.1 Назначение

Генератор сигналов высокочастотный Г4-109 является источником СВЧ колебаний, калиброванных по частоте, уровню выходной мощности, режимам модуляции, и предназначен для проведения различных радиотехнических измерений в промышленности и для научных исследований.

В.2 Технические и метрологические характеристики

В.2.1 Диапазон генерируемых частот 8,51–12,16 ГГц, перекрываемый двумя поддиапазонами.

В.2.2 Генератор имеет классы точности $F - 0,1$; $P - 0,5$; АМ – 10.

В.2.3 Нестабильность частоты через 1 ч после включения, через 30 мин после переключения поддиапазона и через 5 мин после перестройки частоты не превышает $\pm 1 \cdot 10^{-4}$, а нестабильность выходной мощности не превышает $\pm 0,1$ дБ за любые 15 мин работы генератора.

В.2.4 Калиброванная мощность на выходе генератора регулируется в пределах от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-14}$ Вт (0–110 дБ) с помощью встроенного аттенюатора, имеющего регулировки: плавную от 0 до минус 60 дБ и ступенчатую от 0 до минус 50 дБ. Погрешность установки ослабления выходного аттенюатора (относительно опорного уровня мощности $1 \cdot 10^{-3}$ Вт) не превышает $\pm 0,3$ дБ при ослаблениях 0–15 дБ и $\pm 2\%$ от установленного ослабления (в децибелах) при ослаблении свыше 15 дБ. Погрешность установки ослабления ступени +7 дБ относительно 0 дБ ступенчатого аттенюатора не более $\pm 0,3$ дБ.

Погрешность опорного уровня выходной калиброванной мощности 1 мВт в нормальных условиях в режиме НГ при использовании градуировочного графика не более $\pm 0,5$ дБ.

В.2.5 Некалиброванная мощность на выходе генератора не менее 8 мВт.

В.2.6 КСВН выхода генератора при ослаблении выходного аттенюатора в пределах от 0 до минус 7 дБ – не более 1,3 и в пределах от минус 7 до минус 110 дБ – не более 1,2.

В.3 Устройство и принцип работы генератора

Принцип действия генератора и назначение его узлов поясняется структурной схемой рисунка В.1. В структуру генератора входят: генераторный блок, частотомер, усилитель частотомера, делитель мощности, измеритель мощности, выходной аттенюатор и модулятор.

Генераторный блок содержит два клистрона, которые поочередно подключаются к СВЧ тракту с помощью волноводного переключателя. Каждый клистрон имеет механизм перестройки. Указатель положения перестройки частоты позволяет ориентировочно определить генерируемую частоту. Установка

уровня мощности, поступающей в СВЧ тракт от генераторного блока, осуществляется аттенюатором с пределами регулирования 0–30 дБ.

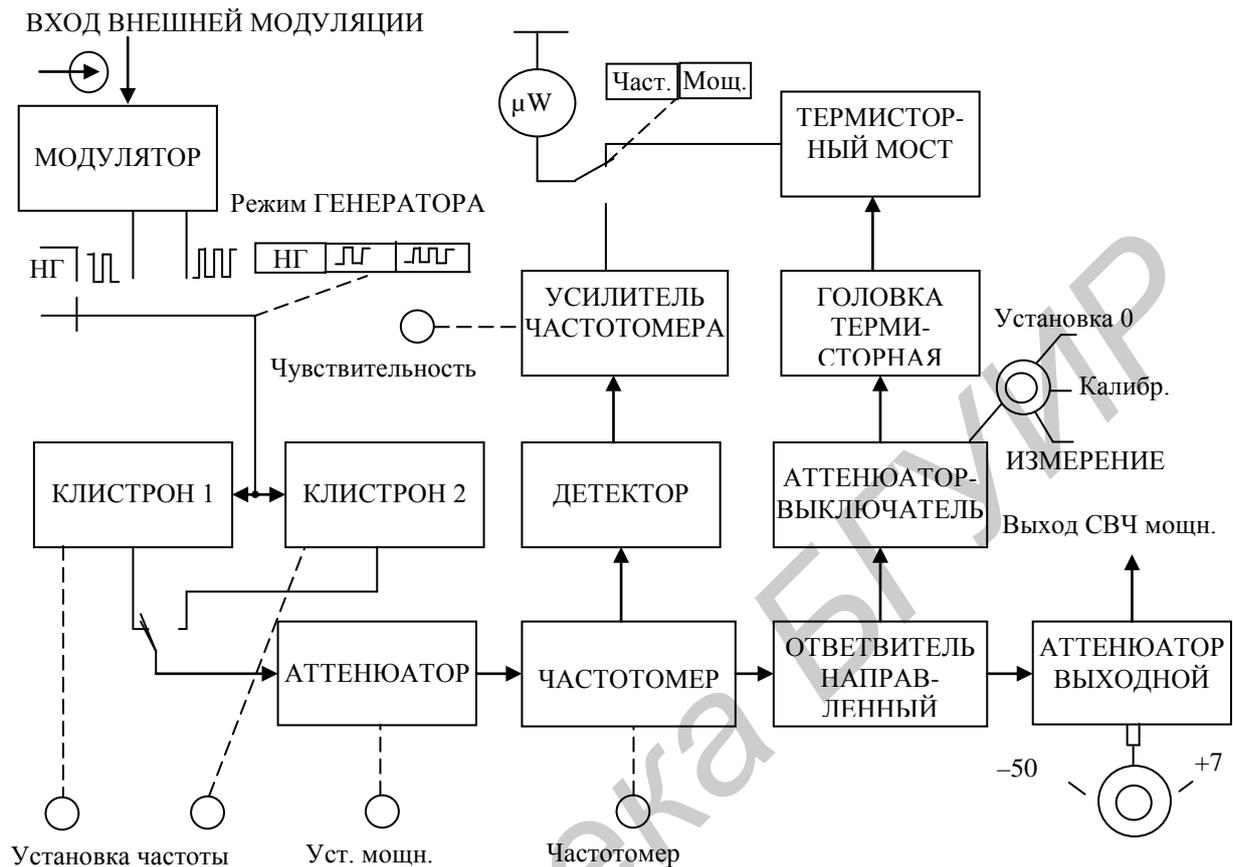


Рисунок В.1 – Структурная схема генератора Г4-109

Частотомер резонансного типа обеспечивает измерение частоты генерируемых колебаний. Момент настройки частотомера в резонанс с измеряемой частотой фиксируется по максимальному отклонению стрелки индикатора. Сигнал резонанса, снимаемый с детектора частотомера, до поступления на индикатор усиливается усилителем.

Делитель мощности включает в себя направленный ответвитель (НО) и аттенюатор-выключатель. Ответвленная НО часть мощности из основного тракта генератора через аттенюатор-выключатель поступает на измеритель мощности для контроля опорного уровня выходной мощности. Аттенюатор-выключатель предназначен для поглощения поступающей на термисторную головку мощности, что необходимо при установке и проверке ухода нуля и калибровке измерителя мощности, а также для защиты термисторной головки от перегрузки при генерировании максимальной некалиброванной мощности.

Измеритель мощности состоит из термисторной головки и термисторного моста. В индикаторную диагональ моста включен стрелочный индикатор.

Выходной аттенюатор предназначен для калиброванного ослабления выходной мощности относительно опорного уровня. Регулировка ослабления осуществляется двумя его секциями: ступенчатой и плавной.

Схема модулятора обеспечивает импульсную модуляцию генерируемого сигнала путем подачи модулирующего напряжения (от внутреннего генератора меандра или от внешних генераторов импульсов) через модуляторный каскад на отражатель клистрона. Установка необходимого режима модуляции производится переключателем «РЕЖИМ ГЕНЕРАТОРА».

Внешний вид прибора Г4-109 представлен на рисунке В.2.

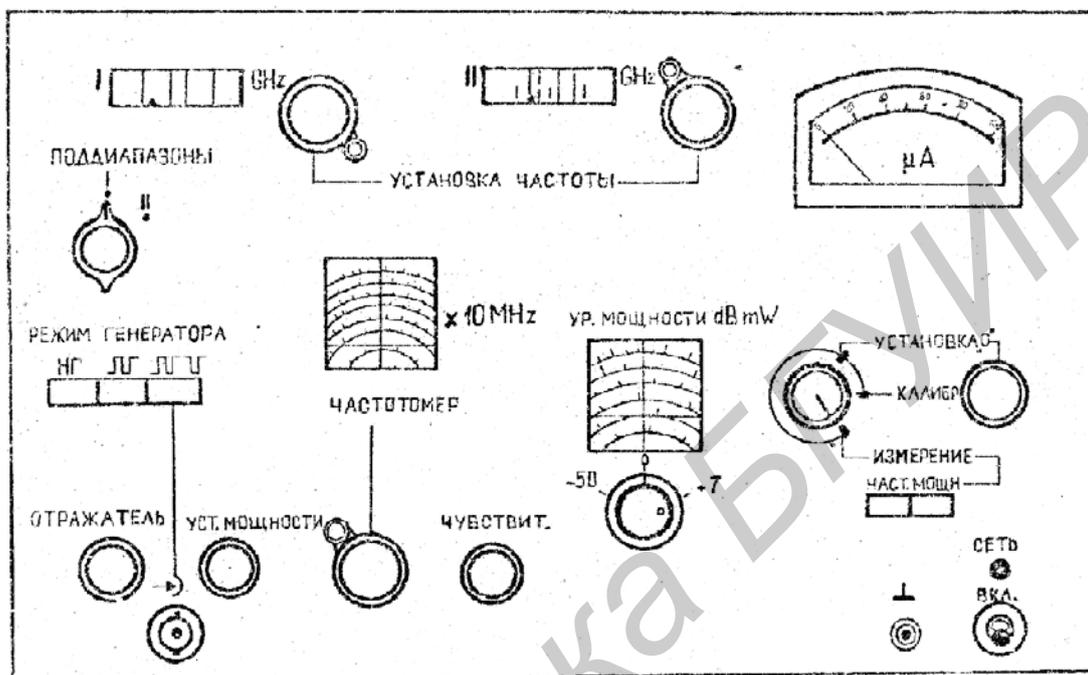


Рисунок В.2 – Внешний вид генератора Г4-109

В.4 Подготовка прибора к работе

В.4.1 Перед началом работы с генератором необходимо ознакомиться с принципом его работы и по надписям на лицевой панели с назначением органов управления.

В.4.2 Установить органы управления в исходное положение: ручки «ОТРАЖАТЕЛЬ» и «УСТ.МОЩНОСТИ» – в крайнее левое положение (против часовой стрелки), ручку ступенчатой регулировки выходного аттенюатора – в положение «- 50» децибел; а по шкале плавной регулировки ослабление 0 дБ, тумблер «Сеть» – в нижнее положение.

В.4.3 Перевести тумблер «СЕТЬ» в верхнее положение, при этом должна загореться сигнальная лампочка. Прогреть прибор в течение 30 мин.

В.4.4 Произвести подготовку прибора к измерениям, для чего:

- установить переключатель «РЕЖИМ ГЕНЕРАТОРА» в положение «НГ», переключатель «ЧАСТ.МОЩН.» – в положение «МОЩН.», ручку «ОТРАЖАТЕЛЬ» – в среднее положение, ручку аттенюатора-выключателя в положение «ИЗМЕРЕНИЕ»;

- вращая ручку «УСТ.МОЩНОСТИ» по часовой стрелке, следить за стрелочным индикатором: отклонение его стрелки является признаком наличия

генерации клистрона соответствующего диапазона;

– переключить ручку «ПОДДИАПАЗОНЫ» на другой поддиапазон, отклонение стрелки индикатора должно наблюдаться и здесь. В случае зашкаливания стрелки или недостаточного ее отклонения регулируйте уровень мощности ручкой «Уст.мощности».

В.5 Проведение измерений с прибором

В.5.1 В генераторе обеспечиваются следующие режимы работы: непрерывная генерация (НГ), внутренняя модуляция меандром ($\square\square\square$).

В.5.2 Для работы генератора в режиме НГ необходимо:

– установить переключатель «РЕЖИМ ГЕНЕРАТОРА» в положение «НГ», переключатель «ЧАСТ.МОЩН.» – в положение «ЧАСТ.», ручку аттенюатора-выключателя – в положение «ИЗМЕРЕНИЕ», ручку «УСТ.МОЩНОСТИ» – в крайнее правое положение, ручку «ОТРАЖАТЕЛЬ» – в среднее положение, ручку ступенчатой регулировки выходного аттенюатора – в положение «– 50» децибел;

– ручкой «ЧАСТОТОМЕР» установить визир шкалы частотомера на заданную частоту, ручку «ЧУВСТВИТ.» – в крайнее правое положение, а ручку «ПОДДИАПАЗОНЫ» – на нужный поддиапазон;

– вращая ручку «УСТАНОВКА ЧАСТОТЫ» (соответствующего поддиапазона) по максимуму отклонения стрелки индикатора, настроить генератор на требуемую частоту, не допуская зашкаливания стрелки индикатора, регулировкой ручек «ЧУВСТВИТ.» и «УСТ.МОЩНОСТИ».

В.5.3 Для получения на выходе генератора калиброванной мощности переключатель «ЧАСТ.МОЩН.» перевести в положение «МОЩН.», а ручку аттенюатора-выключателя – в положение «УСТАНОВКА 0». Ручкой «УСТАНОВКА 0» установить стрелку индикатора на нуль.

Ручку аттенюатора-выключателя перевести в положение «КАЛИБР» и выполнить калибровку измерителя мощности (стрелка индикатора должна отклоняться на 80 дел.).

Ручкой «ЧАСТОТОМЕР» вывести частотомер из положения резонанса. Ручку выключателя-аттенюатора установить в положение «ИЗМЕРЕНИЕ» и ручкой «ОТРАЖАТЕЛЬ» установить максимум показаний стрелочного индикатора.

По графику опорного уровня мощности определить необходимое значение показаний стрелочного индикатора, соответствующее опорному уровню выходной мощности на данной частоте; ручкой «УСТ.МОЩНОСТИ» установить стрелку индикатора на это значение.

Для установки на выходе генератора опорного уровня мощности 1 мВт установить ослабление 0 дБ на шкале плавной регулировки выходного аттенюатора и перевести ручку ступенчатой регулировки в положение «0».

В.5.4 Для получения на выходе генератора максимальной некалиброванной мощности перевести ручку аттенюатора-выключателя в положение «УСТАНОВКА 0», ручку ступенчатой регулировки ослабления выходного ат-

тенюатора – в положение 0 дБ и ручку «УСТ.МОЩНОСТИ» – в крайнее правое положение. Уровень выходной мощности генератора изменять ручкой плавной регулировки ослабления выходного аттенюатора.

В.5.5 Для работы генератора в режиме внутренней модуляции меандром переключатель «РЕЖИМ ГЕНЕРАТОРА» установить в положение «» и выполнить операции, указанные в подразделе В.5.2.

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

ИЗМЕРИТЕЛЬ КСВН ПАНОРАМНЫЙ Р2-61

Г.1 Назначение

Измеритель КСВН панорамный Р2-61 предназначен для измерения и воспроизведения на экране ЭЛТ частотных характеристик КСВН и ослабления элементов волноводных трактов.

Г.2 Технические и метрологические характеристики

Г.2.1 Диапазон рабочих частот измерителя от 8,24 до 12,05 ГГц, сечение волноводного тракта 23×10 мм.

Г.2.2 Пределы измерения КСВН и ослабления соответствуют, а допустимые погрешности измерения КСВН ($\delta_{КСВН}$) и ослабления (Δ_A) пассивных четырехполюсников не превышают значений, приведенных в таблице Г.1.

Г.2.3 Неравномерность уровня калибровки при измерениях и определении погрешности измерения КСВН и ослабления должна быть не более $\pm 0,3$ дБ.

Г.2.4 В измерителе обеспечиваются следующие режимы перестройки частоты:

- ручная перестройка;
- ручное качание;
- автоматическое качание с длительностью периодов 0,08, 1, 10 с;
- разовое качание с длительностью периода 40 с и ручным запуском.

Г.2.5 Полоса качания частоты измерителя:

- максимальная – полный диапазон частот;
- минимальная – не более 120 МГц.

Таблица Г.1

| Измеряемый параметр | Диапазон измерения | | | |
|---|-----------------------|--------------------------|-------------------------|---|
| | КСВН | | 1,05–5,00 | |
| | ослабления, дБ | | 0–35 | |
| Пределы допускаемой погрешности измерения | | | | |
| КСВН | $\delta_{КСВН}, \%$ | На фиксированной частоте | $K_{СТУ} \leq 2,0$ | $\pm 4 \cdot K_{СТУ}$ |
| | | | $K_{СТУ}$ от 2,0 до 5,0 | $\frac{\pm 4 K_{СТУ}}{100 - (\pm 4 K_{СТУ}) \frac{K_{СТУ}}{K_{СТУ} + 1}} \cdot 100$ |
| | | В диапазоне частот | $K_{СТУ} \leq 2,0$ | $\pm 5 \cdot K_{СТУ}$ |
| | | | $K_{СТУ}$ от 2,0 до 5,0 | $\frac{\pm 5 K_{СТУ}}{100 - (\pm 5 K_{СТУ}) \frac{K_{СТУ}}{K_{СТУ} + 1}} \cdot 100$ |
| Ослабление | $\Delta_A, \text{дБ}$ | На фиксированной частоте | $\pm (0,05 A_X + 0,3)$ | |
| | | В диапазоне частот | $\pm (0,05 A_X + 0,5)$ | |

Г.2.6 Основная погрешность определения частоты и граничных частот полосы качания не превышает ± 240 МГц.

Г.2.7 На экране ЭЛТ индикатора наблюдаются две частотные метки. Амплитуда частотных меток регулируется от 0 до 5 мм.

Г.2.8 Измеритель обеспечивает свои характеристики в пределах установленных норм после времени самопрогрева 15 мин.

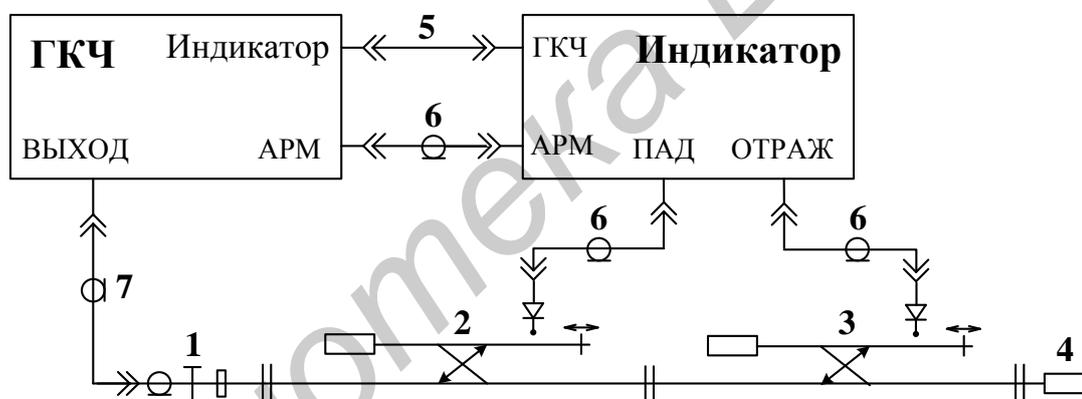
Г.3 Принцип работы измерителя

Г.3.1 Работа измерителя основана на принципе рефлектометра раздельного выделения сигналов, пропорциональных мощности падающей от генератора и отраженной от измеряемого объекта (при измерении КСВН) или прошедшей через измеряемый объект (при измерении ослабления) волн.

Структурная схема прибора в режиме калибровки приведена на рисунке Г.1.

Сигналы, пропорциональные мощности падающей и отраженной волны, снимаются с детекторных головок, встроенных во вторичных каналах направленных детекторов (НД), состоящих из НО и детекторов.

Уровень напряжения на выходе детекторной головки направленного детектора падающей волны поддерживается постоянной системой АРМ генератора.



- 1 – переход коаксиально-волноводный; 2 – детектор направленный «Падающая»; 3 – детектор направленный «Отраженная»; 4 – нагрузка согласованная; 5 – кабель; 6 – кабель соединительный К-9; 7 – кабель соединительный ВЧ

Рисунок Г.1 – Структурная схема прибора в режиме калибровки

Уровень напряжения на выходе детекторной головки направленного детектора отраженной волны при условии квадратичного детектирования пропорционален квадрату коэффициента отражения нагрузки на частоте измерения.

Шкалы индикатора рассчитаны на квадратичность детектирования и проградуированы непосредственно в значениях КСВН и ослабления.

Измерение КСВН или ослабления может производиться как в автоматическом, так и в ручном режиме перестройки частоты.

Измеритель содержит следующие основные функциональные узлы и блоки: генератор качающейся частоты – ГКЧ-61; индикатор Я2Р-67; ком-

плект СВЧ узлов, из которых собирается измерительный тракт.

Г.3.2 Генератор качающейся частоты (ГКЧ) предназначен для генерации высокочастотного сигнала с изменяющейся частотой и стабилизированной выходной мощностью в диапазоне частот относительно частотной характеристики датчика сигнала ошибки.

Г.3.3 Индикатор КСВН и ослабления Я2Р-67 позволяет наблюдать на экране ЭЛТ частотные характеристики КСВН и ослабления, а также производить отсчет измеряемых величин по шкалам отсчетного устройства в автоматическом и ручном режимах перестройки частоты ГКЧ.

Г.3.4 Комплект СВЧ узлов состоит из коаксиально-волноводного перехода, предназначенного для подсоединения волноводного измерительного тракта к коаксиальному выходу ГКЧ; двух направленных детекторов одинаковой конструкции, образующих рефлектометр; согласованной нагрузки, используемой как окончательный поглощающий элемент.

Работа рефлектометра основана на свойстве направленного детектора выделять сигнал СВЧ, распространяющийся в одном направлении, и максимально поглощать сигнал, противоположно направленный. Величина неравномерности частотной характеристики определяет одну из основных составляющих погрешности прибора в диапазоне частот при работе в автоматическом режиме перестройки частоты.

Для получения идентичных частотных характеристик направленных детекторов применяется подстройка подвижными короткозамкнутыми плунжерами.

Величина направленности направленных детекторов составляет 37–38 дБ, коэффициент передачи 2 мВ/мВт при токе смещения диода 50 мА.

Согласованная нагрузка используется для поглощения СВЧ сигнала.

Г.3.5 Измеритель предназначен для измерения КСВН и ослабления в следующих режимах: панорамного измерения в полосе рабочих частот, панорамного измерения в узкой полосе частот, в режиме ручного качания частоты и режиме ручной перестройки частоты.

Внешний вид Р2-61 приведен на рисунке Г.2. Расположение органов управления ГКЧ и индикатора приведены на рисунках Г.3 и Г.4 соответственно.



Рисунок Г.2 – Внешний вид Р2-61



Рисунок Г.3 – Передняя панель ГКЧ



Рисунок Г.4 – Передняя панель индикатора

Г. 4 Подготовка прибора к работе

Г.4.1 ГКЧ, индикатор и СВЧ узлы соединяются по схеме рисунка Г.1. Исходное положение органов управления:

а) индикатора:

- тумблер СЕТЬ – нижнее (выключено);
- переключатель ПРЕДЕЛЫ – ПАД;
- ручки КАЛИБР, ПАД – крайнее левое;
- ручка МЕТКА – крайнее правое;
- ручка ОТСЧЕТ – положение, соответствующее значению 2 mV по шкале mV индикатора;
- кнопка  – нажата;
- кнопки КОРРЕК, ЛОГ, - 10 dB – отжаты;

б) ГКЧ:

- тумблер СЕТЬ – нижнее (выключено);
- переключатель АМ – ВНУТР;
- переключатель ВР.ПЕРЕСТРОЙКИ S – 0,08;

- переключатель РЕЖИМ ПЕРЕСТРОЙКИ – F_1 – F_2 ;
- переключатель ВНЕШ – АМ;
- ручка F_1 , F_0 – крайнее левое;
- ручка F_2 , ΔF – крайнее правое;
- ручки $M1$, $M2$ – среднее;
- АМПЛИТУДА $M1$ и $M2$ – крайнее правое;
- переключатель отсчета – любое;
- тумблер СВЧ – нижнее (выключен).

Г.4.2 Убедиться, что блоки и узлы СВЧ соединены согласно структурной схеме рисунка Г.1. Включить ГКЧ и индикатор и дать им прогреться в течение 15 мин.

Г.4.3 Нажать кнопку F_1 , F_0 переключателя ГКЧ и ручкой F_1 , F_0 установить по табло ГКЧ нижнюю частоту полосы качания $f_H = 8,25$ ГГц.

Нажать кнопку F_2 , ΔF переключателя ГКЧ и ручкой F_2 , ΔF установить по табло ГКЧ верхнюю частоту полосы качания $f_B = 12,05$ ГГц.

Г.4.4 Установка уровня мощности ГКЧ:

- поставить тумблер СВЧ в верхнее положение (включено);
- установить ручкой «ОТСЧЕТ» визир по шкале mV на 2 мВ;
- совместить ручкой «УРОВЕНЬ» в ГКЧ и ПАД в индикаторе линию падающей мощности на экране индикатора с линией электронного визира.

Г.4.5 Регулировка амплитуды и положения частотных меток:

- убедиться, поворачивая поочередно ручки «АМПЛИТУДА $M1$, $M2$ » и МЕТКА, в возможности регулирования амплитуды меток в пределах 0–10 мм, после чего установить удобную для работы амплитуду (5–10 мм);
- совместить ручками « $M1$ » и « $M2$ » метки с началом и концом наблюдаемой на экране линии развертки.

Г.4.6 Калибровка прибора в полосе частот:

- установить ручкой «ОТСЧЕТ» визир на отметку 0 по верхней шкале dB;
- установить переключатель «ПРЕДЕЛЫ» в положение 0;
- совместить ручкой «КАЛИБР» наблюдаемую на экране линию калибровки с отсчетной линией так, чтобы отсчетная линия проходила по середине линии калибровки;
- нажать кнопку «КОРРЕК».

Г.5 Проведение измерений

Г.5.1 Панорамное измерений КСВН в полосе частот.

Перед измерением подготовить к работе и откалибровать прибор в полосе частот 8,25–12,05 ГГц по методике раздела Г.4 настоящего приложения.

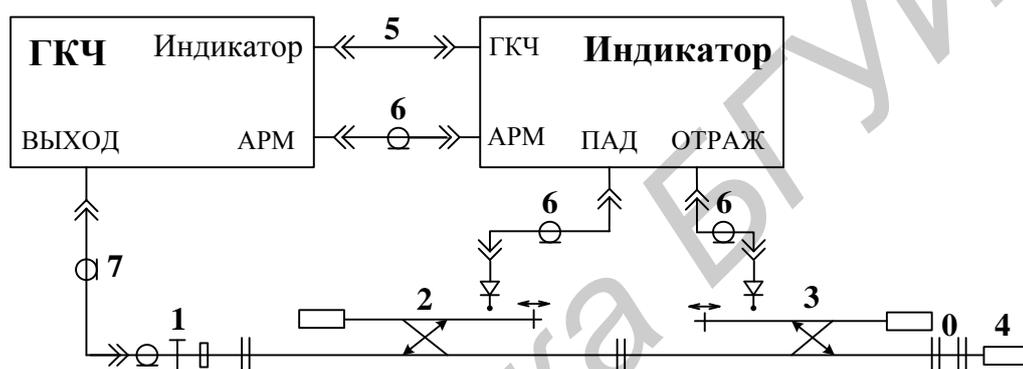
Для измерения КСВН проделать операции:

- собрать схему измерения в соответствии с рисунком Г.5 и подсоединить измеряемый объект;
- установить переключателем «ВР.ПЕРЕСТРОЙКИ» желаемый период перестройки 0,08 или 1 с;

- переключатель «ПРЕДЕЛЫ» поставить в положение, при котором характеристика КСВН располагается вблизи середины экрана;
- нажать кнопку «М1» и ручкой «М1» на табло ГКЧ установить частоту, на которой будет производиться измерение;
- совместить ручкой «ОТСЧЕТ» линию электронного визира и частотную метку с характеристикой КСВН. По шкале КСВН отсчетного устройства индикатора отсчитать измеренное значение КСВН.

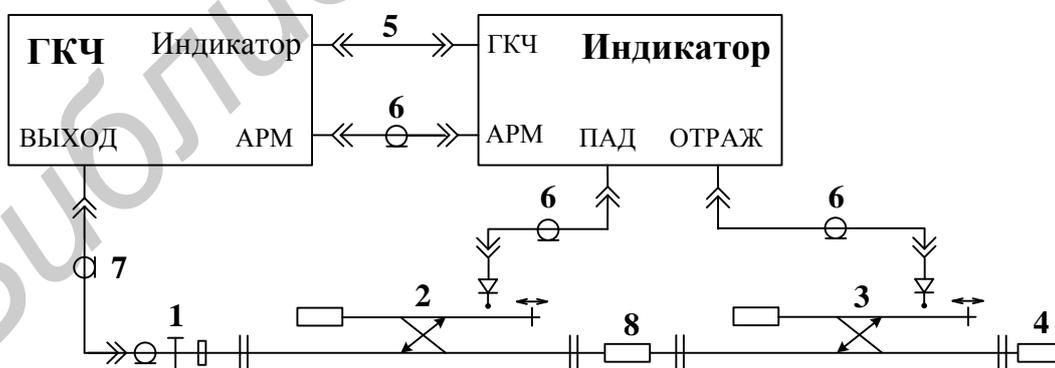
Г.5.2 Панорамное измерение ослабления в полосе частот.

Перед измерением подготовить прибор к работе и откалибровать его в полосе частот 8,25–12,05 ГГц по методике раздела Г.4 настоящего приложения. Собрать схему измерения в соответствии с рисунком Г.6 и подсоединить измеряемый объект между направленными детекторами.



- 0 – объект измерения; 1 – переход коаксиально-волноводный; 2 – детектор направленный «Падающая»; 3 – детектор направленный «Отраженная»; 4 – нагрузка согласованная; 5 – кабель; 6 – кабель соединительный К-9; 7 – кабель соединительный ВЧ

Рисунок Г.5 – Схема структурная измерения КСВН



- 1 – переход коаксиально-волноводный; 2 – детектор направленный «Падающая»; 3 – детектор направленный «Отраженная»; 4 – нагрузка согласованная; 5 – кабель; 6 – кабель соединительный К-9; 7 – кабель соединительный ВЧ; 8 – объект измерения

Рисунок Г.6 – Схема структурная измерения ослабления

Операции измерения аналогичны операциям подраздела Г.5.1 при измерении КСВН. Измеряемое значение ослабления определяется как алгебраическая сумма (с учетом знака) величины ослабления, соответствующего положению переключателя «ПРЕДЕЛЫ» со знаком минус, и величины, отсчитанной по шкале «dВ».

Библиотека БГУИР

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(обязательное)

ИЗМЕРИТЕЛЬ РАЗНОСТИ ФАЗ Ф2-34

Д.1 Назначение

Д.1.1 Измеритель разности фаз Ф2-34 предназначен для измерения фазовых сдвигов между двумя синхронными синусоидальными сигналами с цифровым отображением информации.

Д.1.2 Измеритель может быть использован для снятия фазочастотных характеристик радиотехнических цепей, фильтров, усилителей, определения последовательного резонанса кварцевых фильтров, резонаторов и других устройств.

Д.2 Технические и метрологические характеристики

Д.2.1 Диапазон рабочих частот от 0,5 Гц до 5 МГц.

Д.2.2 Диапазон измерения фазовых сдвигов сигналов в рабочем диапазоне частот от 0 до 360°. Разрешающая способность индикатора 0,01°.

Д.2.3 Погрешность измерения фазовых сдвигов на различных частотах входного сигнала не превышает значений, приведенных в таблице Д.1.

Таблица Д.1

| Частота f , Гц | Погрешность, град |
|-------------------------|---|
| $0,5 < f < 1$ | $\pm \left(\frac{0,25}{f} \right)$ |
| $1 < f < 20$ | $\pm \left(0,08 + \frac{0,1}{f} \right)$ |
| $20 < f < 5 \cdot 10^6$ | $\pm(0,1 + 10^{-7}f)$ |

Д.2.4 Погрешность измерения фазовых сдвигов из-за неравенства уровней входных напряжений не превышает значений, приведенных в таблице Д.2.

Таблица Д.2

| Частота f , Гц | Перепад уровней входных напряжений, дБ | | |
|-----------------------------------|--|---------------------------|-----------------------------|
| | $0 < A < 20$ | $20 < A < 40$ | $40 < A < 60$ |
| $0,5 < f < 1$ | $\pm 0,1 \text{ A}^\circ$ | $\pm 0,3 \text{ A}^\circ$ | - |
| $1 < f < 5$ | $\pm 0,075 \text{ A}^\circ$ | | - |
| $5 < f < 2 \cdot 10^5$ | $\pm 0,03 \text{ A}^\circ$ | | |
| $2 \cdot 10^5 < f < 2 \cdot 10^6$ | $\pm 0,05 \text{ A}^\circ$ | | $\pm 0,075 \text{ A}^\circ$ |
| $2 \cdot 10^6 < f < 5 \cdot 10^6$ | $\pm 0,1 \text{ A}^\circ$ | | $\pm 0,15 \text{ A}^\circ$ |

Д.2.5 Входное активное сопротивление прибора не менее 1 МОм, входная емкость – не более 25 пФ.

Д.2.6 Прибор обеспечивает работу в режимах измерения абсолютного фазового сдвига и измерения приращения фазового сдвига.

Режим измерения абсолютного фазового сдвига прибора устанавливается при нажатии кнопки «Ф», режим измерения приращения фазовых сдвигов – при нажатии кнопки «ΔФ».

Д.3 Устройство и принцип работы

Измеритель разности фаз Ф2-34 представляет собой триггерный фазометр с времяимпульсным преобразованием и постоянным временем измерения. Принцип работы измерителя и взаимодействие его основных функциональных узлов поясняется упрощенной структурной схемой (рисунок Д.1).

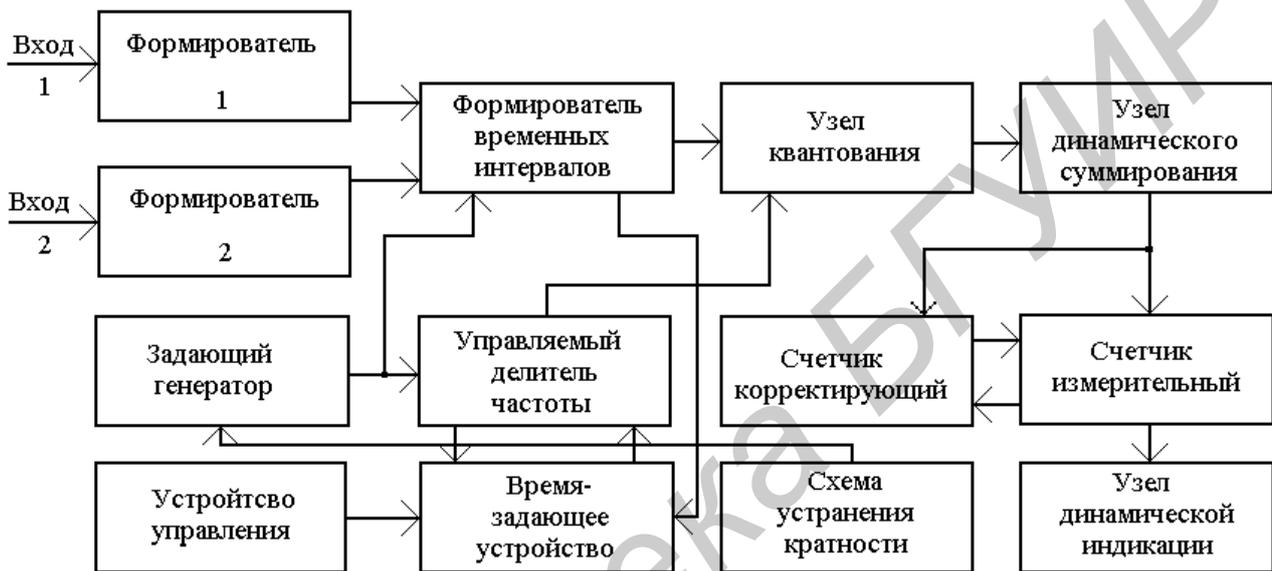


Рисунок Д.1 – Структурная схема цифрового фазометра Ф2-34

Опорный сигнал подается на вход формирователя 2, а исследуемый сигнал – на вход формирователя 1. На выходе формирователей вырабатываются прямоугольные импульсы, фронт и срез которых соответствуют переходам входных сигналов через нулевую отметку. Формирователь временных интервалов (ФВИ) формирует четыре временных интервала, представляющие собой прямоугольные импульсы положительной полярности, скважность которых пропорциональна измеряемому фазовому сдвигу, а частота следования равна половине частоты входного сигнала. Синхронизация работы ФВИ с другими узлами осуществляется в начале каждого цикла измерения импульсом запуска из устройства управления.

С выхода ФВИ четыре временных интервала подаются на входы узла квантования, где они заполняются счетными импульсами. В результате формируются четыре импульсные последовательности временных интервалов, общее число импульсов в которых за цикл измерения пропорционально измеряемому фазовому сдвигу.

Узел динамического суммирования предназначен для предварительного деления частоты четырех импульсных последовательностей временных интервалов и объединения их в одну импульсную последовательность с сохранением

общего числа импульсов. Установка необходимого коэффициента деления и синхронизация работы узла динамического суммирования осуществляется по сигналам устройства управления.

С выхода узла динамического суммирования сигнал подается в измерительный счетчик, который подсчитывает общее число импульсов, поступивших на него за цикл измерения, и выдает результат на устройство индикации. В начале каждого цикла измерения измерительный счетчик устанавливается в состояние, идентичное состоянию корректирующего счетчика.

Корректирующий счетчик предназначен для хранения кода фазового сдвига, измеренного в режиме калибровки, и выдачи его на измерительный счетчик.

При нажатии кнопки « $\Delta\phi$ » на передней панели прибора корректирующий счетчик подсчитывает общее число импульсов, поступающих за цикл калибровки. Код числа, дополняющий подсчитанное число до значения $360,00^\circ$, переписывается в измерительный счетчик в начале каждого цикла измерения. Это означает, что значению фазового сдвига, который был между сигналами до момента нажатия кнопки « $\Delta\phi$ », будет соответствовать нулевое показание индикатора. В этом случае прибор работает в режиме измерения приращения фазового сдвига.

При нажатии кнопки « ϕ » на передней панели прибора устройство управления выдает сигнал, в соответствии с которым вход формирователя 2 отключается от входного разъема и подключается параллельно входу формирователя 1. После этого в приборе выполняются операции, аналогичные режиму измерения приращения фазовых сдвигов. После завершения калибровки прибора вход формирователя 2 по команде устройства управления снова подключается к входу 2 прибора и производится измерение абсолютного фазового сдвига между сигналами, поданными на входы фазометра.

Задающий генератор (ЗГ) вырабатывает импульсы частотой 28 МГц. Управляемый делитель частоты формирует из импульсов задающего генератора квантуемые импульсы для узла квантования, частота которых дискретно изменяется по сигналам управления времязадающего узла (ВЗУ). ВЗУ выполняет функции формирования времени измерения и работает синхронно с формирователем временных интервалов.

Устройство управления формирует серию импульсов, синхронизирующих работу всех узлов фазометра по окончании каждого цикла измерения, при поступлении команд управления и нажатии кнопок « ϕ » и « $\Delta\phi$ ».

Схема устранения кратности вырабатывает сигнал, изменяющий частоту задающего генератора при наличии нестабильности показаний прибора, вызванной кратностью частот входного сигнала и квантуемой импульсной последовательности.

Внешний вид фазометра Ф2-34 представлен на рисунке Д.2.

Д.4 Подготовка к работе

Д.4.1 Включить переключатель СЕТЬ на лицевой панели прибора. При этом должна работать цифровая индикация прибора.

Д.4.2 Прогреть прибор в течение 15 мин, после чего прибор готов к работе.



Рисунок Д.2 – Внешний вид фазометра Ф2-34

Д.5 Проведение измерений

Д.5.1 Режим измерения фазовых сдвигов

Нажмите кнопку «ф» на передней панели фазометра Ф2-34. После окончания цикла установки нуля, который длится примерно 70 с (об окончании установки нуля свидетельствует периодическое свечение нижнего сегмента символьного разряда индикатора), прибор начинает индицировать значение фазового сдвига исследуемого сигнала, поданного на вход 1, относительно опорного сигнала, поданного на вход 2.

Д.5.2 Режим измерения приращения фазового сдвига

Нажмите кнопку «Δφ» на передней панели фазометра Ф2-34.

Внимание! Момент нажатия этой кнопки не должен совпадать с моментом свечения нижнего сегмента символьного разряда индикатора. Если кнопка была нажата в момент свечения указанного сегмента, необходимо нажать ее повторно.

После проведения цикла установки нуля прибор индицирует значение приращения фазового сдвига между сигналами относительно того значения фазового сдвига, которое было во время проведения цикла установки нуля.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

(обязательное)

ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ НИЗКОЧАСТОТНЫЙ ГЗ-109

Е.1 Назначение

Генератор измерительный низкочастотный ГЗ-109 является источником гармонических сигналов и предназначен для регулировки, испытания и ремонта различных радиотехнических устройств в телевидении, радиовещании, акустике, технике связи в лабораторных и производственных условиях.

Е.2 Технические и метрологические характеристики

Е.2.1 Диапазон генерируемых частот генератора от 20 Гц до 200 кГц перекрывается четырьмя поддиапазонами с плавной перестройкой частоты внутри поддиапазонов.

Е.2.2 Основная погрешность установки частоты не превышает значений, указанных в таблице Е.1.

Таблица Е.1

| Диапазон частот, кГц | Погрешность, % |
|---------------------------------------|---|
| 0,02–0,2 (первый поддиапазон) | $\pm \left(2 + \frac{50}{f_H} \right)$ |
| 0,2–20 (второй и третий поддиапазоны) | $\pm \left(1 + \frac{50}{f_H} \right)$ |
| 20–200 (четвертый поддиапазон) | $\pm \left(1 + \frac{50}{f_H} \right)$ |

Примечание – f_H – номинальное значение частоты, устанавливаемое по шкале частот «Hz», Гц.

Е.2.3 Нестабильность частоты генератора за любые 3 ч работы после времени установления рабочего режима при нормальных условиях не превышает $\pm 5 \cdot 10^{-3} f_H$.

Е.2.4 Номинальное выходное напряжение генератора на гнезде «ВЫХОД 1» при сопротивлении нагрузки 50 Ом не менее 15 В. Выходное напряжение плавно регулируется в пределах не менее 20 дБ от своего номинального значения.

Е.2.5 Основная приведенная погрешность установки опорного значения выходного напряжения на гнезде «ВЫХОД 1» при положении аттенюатора «15 V» не превышает ± 4 %.

Е.2.6 В генераторе на гнезде «ВЫХОД 1» предусмотрена ступенчатая регулировка выходного напряжения, которая осуществляется с помощью встроенного аттенюатора 60 дБ ступенями через 10 дБ. Погрешность ослабления встроенного аттенюатора при активной нагрузке 50 Ом не превышает ± 6 %.

Е.3 Устройство и принцип работы генератора

Структурная схема генератора представлена на рисунке Е.1. Источником синусоидального сигнала служит задающий *RC*-генератор, сигнал которого через предварительный усилитель поступает на усилитель мощности. Усилитель мощности обеспечивает получение на нагрузке 50 Ом среднеквадратичного значения напряжения 15 В. Атенюатор ослабляет выходной сигнал на 60 дБ ступенями через 10 дБ. Уровень сигнала, подаваемого на аттенюатор, измеряется индикатором выходного уровня.

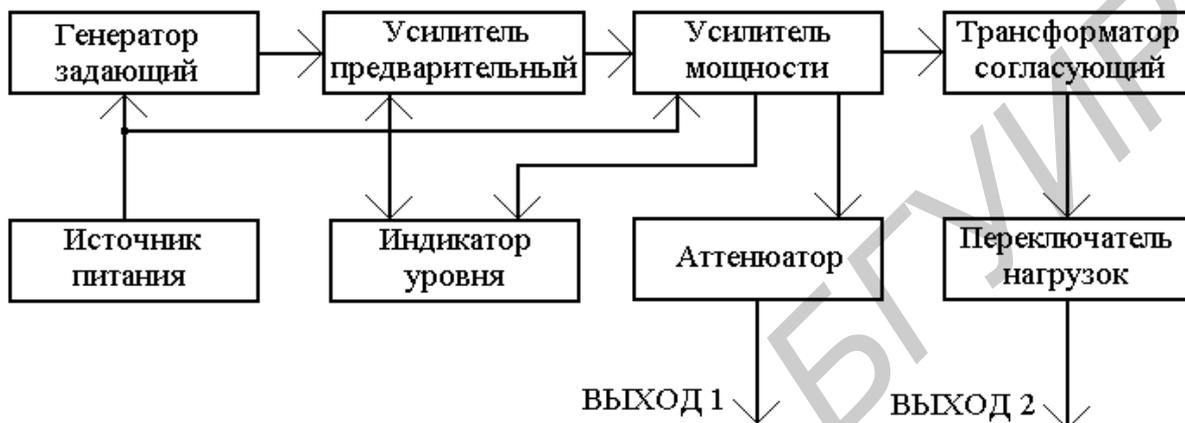


Рисунок Е.1 – Структурная схема измерительного генератора ГЗ-109

К усилителю мощности могут подключаться согласующие трансформаторы для работы на нагрузках 600 Ом и 5 кОм. Переключатель нагрузок коммутирует выходные нагрузки генератора.

Внешний вид генератора представлен на рисунке Е.2.



Рисунок Е.2 – Внешний вид ГЗ-109

Е.4 Подготовка генератора к работе

Е.4.1 Установить ручку «РЕГУЛИРОВКА ВЫХ.» в крайнее левое положение.

Е.4.2 Тумблер включения сети установить в положение «СЕТЬ ВКЛ.», при этом должна светиться сигнальная лампочка.

Е.4.3 Дать генератору прогреться в течение 15 мин. После прогрева генератор готов к работе.

Е.5 Проведение измерений

Е.5.1 С помощью ручки плавной перестройки частоты и переключателя «МНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ» установить необходимую частоту выходного сигнала. Значения частот каждого поддиапазона генератора ГЗ-109 приведены в таблице Е.2.

Е.5.2 Регулировка уровня выходного напряжения с гнезда «ВЫХОД 1» осуществляется плавно с помощью потенциометра «РЕГУЛИРОВКА ВЫХ.» и ступенями с помощью встроенного аттенюатора «15 mV – 15 V». Измерение выходного напряжения производится с помощью стрелочного прибора, расположенного на передней панели генератора

Таблица Е.2

| Положение переключателя «МНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ» | Значение частоты поддиапазона, Гц |
|---|-----------------------------------|
| × 1 | 20–200 |
| × 10 | 200–2000 |
| × 10 ² | 2000–20000 |
| × 10 ³ | 20000–200000 |

ПРИМЕЧАНИЕ – При переключении частотных поддиапазонов и плавной перестройке частоты допускается время установления выходного напряжения генератора порядка 10 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж
(обязательное)

ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНСА Е7-14

Ж.1 Назначение

Измеритель иммитанса Е7-14 предназначен для измерения параметров резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности: сопротивления R ; емкости C ; индуктивности L ; добротности Q ; фактора потерь D .

Ж.2 Технические и метрологические характеристики

Ж.2.1 Рабочая частота 0,1; 1 и 10 кГц с погрешностью установки не более 0,01 %.

Ж.2.2 Диапазон измерения и пределы допускаемого значения основной погрешности измерения параметров на частоте 1 кГц приведены в таблице Ж.1.

Е7-14 обеспечивает автоматический или ручной выбор пределов измерения.

Таблица Ж.1

| Параметры | Предел измерения | Диапазоны | Погрешность измерения |
|-----------|------------------|-----------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| C | 1 | 0,01–160,00 pF | $10^{-3}(1 + D_X)C_X + 2,5 \cdot 10^{-4}C_K$ |
| | 2 | 0,1–1600,00 pF | $10^{-3}(1 + D_X)C_X + 2 \cdot 10^{-4}C_K$ |
| | 3 | 0,001–16,000 nF | |
| | 4 | 0,01–160,00 nF | |
| | 5 | 0,1–1600,0 nF | |
| | 6 | 1,6000–16,00 μF | $[10^{-3}(1 + D_X) + 2 \cdot 10^{-3} C_X/C_K]C_X$ |
| | 7 | 16,000–160,0 μF | $[10^{-3}(1+D_X)+2,5 \cdot 10^{-3} C_X/C_K]C_X$ |
| | 8 | 160,00–1600 μF | |
| L | 1 | 160,00–1600 H | $[10^{-3}(1 + D_X) + 2,5 \cdot 10^{-3} L_X/L_K]L_X$ |
| | 2 | 16,000–160,0 H | $[10^{-3}(1 + D_X) + 2 \cdot 10^{-3} L_X/L_K]L_X$ |
| | 3 | 1,6000–16,00 H | |
| | 4 | 160,00–1600 mH | |
| | 5 | 16,000–160,0 mH | |
| | 6 | 0,001–16,000 mH | $10^{-3}(1 + D_X)L_X + 2 \cdot 10^{-4}L_K$ |
| | 7 | 0,1–16000 μH | |
| | 8 | 0,01–160,000 μH | $10^{-3}(1 + D_X)L_X + 2,5 \cdot 10^{-4}L_K$ |
| R | 1 | 1,000–10,00 $M\Omega$ | $[10^{-3}(1+Q_X)+2,5 \cdot 10^{-3} R_X/R_K]R_X$ |
| | 2 | 100,00–1000 $k\Omega$ | $[10^{-3}(1+Q_X)+2 \cdot 10^{-3} R_X/R_K]R_X$ |
| | 3 | 10,00–100,0 $k\Omega$ | |
| | 4 | 1,000–10,00 $k\Omega$ | |
| | 5 | 100,00–1000 Ω | |

Продолжение таблицы Ж.1

| | 6 | 0,01–100,0 Ω | $10^{-3}(1+Q_X)R_X + 2 \cdot 10^{-4}R_K$ |
|-----------|------------------|-------------------------------|---|
| Параметры | Предел измерения | Диапазоны | Погрешность измерения |
| <i>R</i> | 7 | 0,001–10,000 Ω | |
| | 8 | 0,1–1000,0 мΩ | $10^{-3}(1+Q_X)R_X + 2,5 \cdot 10^{-4}R_K$ |
| <i>D</i> | 1 | На 1 пределе изм. <i>C</i> | $10^{-3}(1+D_X^2)+2,5 \cdot 10^{-4}(1+D_X)C_K/C_X$ |
| | 2–5 | На 2–5 пределах изм. <i>C</i> | $10^{-3}(1+D_X^2)+2 \cdot 10^{-4}(1+D_X)C_K/C_X$ |
| | 6, 7 | На 6,7 пределах изм. <i>C</i> | $10^{-3}(1+D_X^2)+2 \cdot 10^{-3}(1+D_X)C_X/C_K$ |
| | 8 | На 8 пределе изм. <i>C</i> | $10^{-3}(1+D_X^2)+2,5 \cdot 10^{-3}(1+D_X)C_X/C_K$ |
| <i>Q</i> | 1 | На 1 пределе изм. <i>L</i> | $10^{-3}(1+Q_X^2)+2,5 \cdot 10^{-3}Q_X(1+Q_X)L_X/L_K$ |
| | 2–5 | На 2–5 пределах изм. <i>L</i> | $10^{-3}(1+Q_X^2)+2 \cdot 10^{-3}Q_X(1+Q_X)L_X/L_K$ |
| | 6, 7 | На 6,7 пределах изм. <i>L</i> | $10^{-3}(1+Q_X^2)+2 \cdot 10^{-4}Q_X(1+Q_X)L_K/L_X$ |
| | 8 | На 8 пределе изм. <i>L</i> | $10^{-3}(1+Q_X^2)+2,5 \cdot 10^{-4}Q_X(1+Q_X)L_K/L_X$ |

Примечания
 1 Пределы измерения параметров *D* и *Q* равны 10^{-4} – 10^4 .
 2 C_K, L_K, R_K – конечные значения диапазонов измерения.
 3 C_X, L_X, R_X, Q_X и D_X – измеренные значения параметров.

Ж.3 Принцип работы измерителя

Измеритель иммитанса Е7-14 – цифровой автоматический измеритель комплексного сопротивления на основе уравновешенного моста. Баланс моста осуществляется автоматическим регулированием элементов моста (для каждого из измеряемых параметров). Мостовая схема построена на основе фазочувствительных детекторов уравнивания. Питание мостовой схемы осуществляется от генератора переменного напряжения на фиксированных частотах.

Внешний вид и расположение органов управления на лицевой панели измерителя иммитанса Е7-14 приведены на рисунке Ж.1.



Рисунок Ж.1 – Внешний вид измерителя иммитанса E7-14

Ж.4 Подготовка прибора к работе

Ж.4.1 Установить переключатель СЕТЬ в положение ВКЛ. При этом все цифровые индикаторы и светодиоды должны периодически загораться и гаснуть в течение нескольких секунд (идет самодиагностика).

Ж.4.2 После окончания самодиагностики загораются светодиоды на следующих кнопках:

| | |
|--------------|--|
| ЧАСТОТА kHz | 1 |
| УРОВ СИГН V | 2 |
| СМЕЩЕНИЕ | ВНУТР |
| ПАРАМЕТРЫ | C и R/G |
| ЭКВИВ СХЕМА |  (автоматический выбор эквивалентной схемы) |
| ПРЕДЕЛ ИЗМЕР |  (автоматический выбор предела измерения) |

Ж.5 Проведение измерений

Ж.5.1 Подключить исследуемый ДП к зажимам присоединительного устройства прибора.

Ж.5.2 При измерении каждого параметра ДП необходимо выполнить следующие операции в строгой последовательности:

- нажать кнопку ТЕСТ;
- нажать кнопку измеряемого параметра, например R;
- нажать кнопку ТЕСТ;
- нажать кнопку ЗАПУСК  или .

На цифровом индикаторе высвечивается значение измеряемого параметра (например R). В такой последовательности производятся измерения любого другого параметра (C, L, D, Q).

Ж.5.3 После окончания измерений отключить объект измерений, тумблер СЕТЬ перевести в нижнее выключенное положение.

ПРИЛОЖЕНИЕ И (обязательное)

ИЗМЕРИТЕЛЬ ДОБРОТНОСТИ Е4-7

И.1 Назначение

Измеритель добротности Е4-7 предназначен для измерения эффективной добротности объектов индуктивного характера, а также собственной емкости этих объектов и резонансной частоты контуров. С помощью прибора путем косвенных измерений можно определить индуктивность измеряемых объектов, емкость и тангенс угла потерь конденсаторов, полное сопротивление двухполюсников.

И.2 Технические и метрологические характеристики

И.2.1 Диапазон рабочих частот генератора измерителя добротности Е4-7 от 50 кГц до 35 МГц с непосредственным отсчетом частоты имеет восемь поддиапазонов:

- | | | |
|-----------------|------------------|----------------|
| 1) 50–110 кГц; | 4) 560–1300 кГц; | 7) 7,0–16 МГц; |
| 2) 110–240 кГц; | 5) 1,3–3,0 МГц; | 8) 16–35 МГц. |
| 3) 240–560 кГц; | 6) 3,0–7,0 МГц; | |

И.2.2 Основная погрешность градуировки шкал генератора по частоте не более $\pm 1\%$.

И.2.3 Пределы непосредственного отсчета добротности от 5 до 1000. Отсчет производится по четырем шкалам:

- | | | | |
|----------|-----------|-----------|------------|
| 1) 0–30; | 2) 0–100; | 3) 0–300; | 4) 0–1000. |
|----------|-----------|-----------|------------|

И.2.4 Основная погрешность измерения добротности в процентах от измеряемого значения не превышает значений, указанных в таблице И.1.

Таблица И.1

| Пределы измеряемой добротности | Частота измерения, МГц | |
|--------------------------------|------------------------|---------------------|
| | от 0,05 до 25 | свыше 25 до 35 |
| 10–30; 30–100; 100–300 | $\pm (3 + Q_K/Q)\%$ | $\pm (6 + Q_K/Q)\%$ |
| 300–1000 | $\pm (6 + Q_K/Q)\%$ | $\pm (6 + Q_K/Q)\%$ |

Примечание – Q_K – конечное значение рабочей части шкалы, по которой производится отсчет добротности; Q – измеренное значение добротности.

И.2.5 Пределы непосредственного отсчета изменения емкости измерительного комбинированного блока (образцового конденсатора) от 30 до 450 пФ.

И.2.6 Основная погрешность градуировки шкалы измерительного конденсатора на частоте 1000 Гц не превышает $\pm 1\%$ при емкости до 100 пФ и не более $\pm 1\%$ при емкости свыше 100 пФ.

И.2.7 Предел нониусной шкалы измерительного конденсатора 10 пФ, градуировка шкалы через 0,1 пФ.

И.2.8 Напряжение, вводимое в контур, на всех частотных поддиапазонах прибора 20 мВ ± 15 %.

И.2.9 Прибор обеспечивает измерение индуктивности по результатам измерения емкости и частоты резонансным методом в пределах от $5 \cdot 10^{-8}$ Гн до 0,4 Гн с погрешностью не более $\pm(0,006L + 2,5 \cdot 10^{-9}$ Гн) при емкостях до 100 пФ и не более $\pm(0,04L + 2,5 \cdot 10^{-9}$ Гн) при емкостях более 100 пФ, где L – измеренное значение индуктивности.

И.3 Устройство и принцип работы прибора

Структурная схема прибора, поясняющая принцип его работы, приведена на рисунке И.1, а его внешний вид – на рисунке И.2.

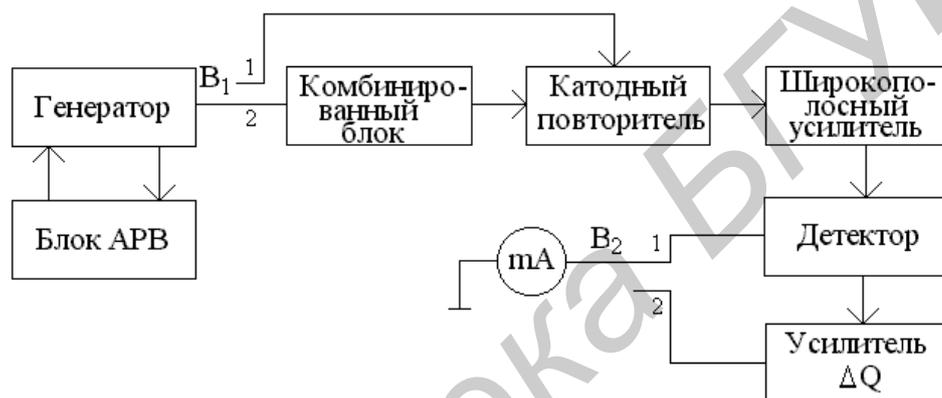


Рисунок И.1 – Структурная схема Е4-7

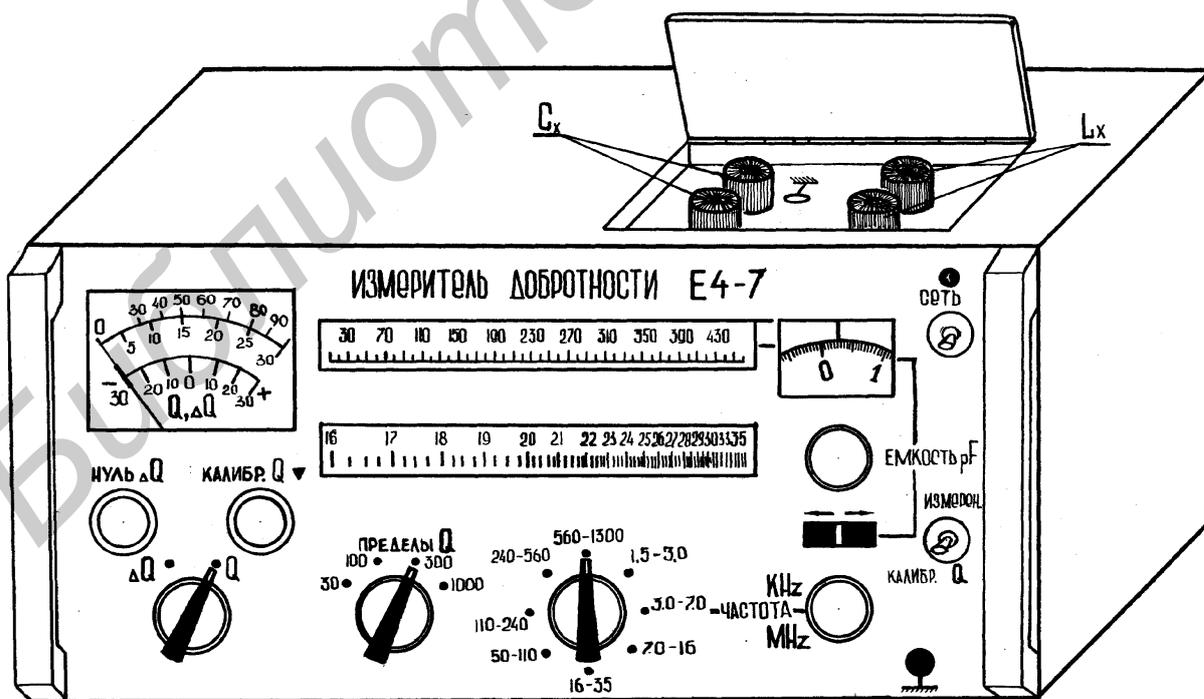


Рисунок И.2 – Внешний вид прибора Е4-7

Измеритель добротности Е4-7 представляет собой резонансный измеритель параметров ДП контурного типа.

Генераторный блок Е4-7 предназначен для получения синусоидальных колебаний в диапазоне частот от 50 кГц до 35 МГц, имеет восемь поддиапазонов. С помощью блока АРН (автоматическая регулировка напряжения) обеспечивается стабилизация выходного напряжения генераторного блока.

Комбинированный блок обеспечивает согласование выхода генератора с измерительным конденсатором, который находится в комбинированном блоке. К клеммам комбинированного блока подключается исследуемый объект. С помощью катодного повторителя обеспечивается большое входное сопротивление широкополосного усилителя, необходимого для усиления малых сигналов с выхода комбинированного блока. После усиления и детектирования сигнал подается на измерительный прибор, который фиксирует напряжение на измерительном конденсаторе. При измерении приращений добротности используется дополнительный усилитель ΔQ .

В приборе предусмотрены два режима работы: калибровка и измерение.

В режиме «КАЛИБРОВКА» стабилизированный блоком АРН синусоидальный сигнал из генераторного блока поступает через переключатель В1 (положение 1), катодный повторитель, регулируемый по коэффициенту усиления широкополосный усилитель, детектор и переключатель В2 (положение 1) на измерительный прибор. На шкале измерительного прибора нанесена калибровочная отметка « ∇ ».

В режиме «ИЗМЕРЕНИЕ» сигнал с генераторного блока поступает через переключатель В1 (положение 2) на вход комбинированного блока, к которому подключается измеряемый объект. Дальнейший путь сигнала соответствует режиму «КАЛИБРОВКА». Шкала измерительного прибора в этом случае непосредственно проградуирована в единицах добротности.

И.4 Подготовка прибора к работе

И.4.1 Перед началом измерений необходимо ознакомиться с принципом работы прибора и с назначением органов управления на его передней панели.

И.4.2 Установить органы управления в исходное положение: переключатель рода измерений « $\Delta Q-Q$ » в положение «Q», тумблер «ИЗМЕРЕН.–КАЛИБР. Q» – в положение «ИЗМЕРЕН.», тумблер «СЕТЬ» – в нижнее положение.

И.4.3 Включить вилку шнура питания в сеть и перевести тумблер «СЕТЬ» в верхнее положение, при этом должна загореться индикаторная лампочка. Прогреть прибор в течение 30 мин.

И.4.4 Произвести подготовку прибора к измерениям, для чего:

– установить тумблер «ИЗМЕРЕН.–КАЛИБР. Q» в положение «КАЛИБР.»;

– установить переключатель « $\Delta Q-Q$ » в положение « ΔQ »;

– ручкой «КАЛИБР. Q_{∇} » установить стрелку измерительного прибора на

риску под знаком «∇»;

– тумблер «ИЗМЕРЕН.–КАЛИБР. Q» вернуть в положение «ИЗМЕРЕН.».

И.5 Проведение измерений

И.5.1 Калибровка прибора

Для калибровки прибора на частоте измерений необходимо установить:

– переключатель «ЧАСТОТА $\frac{\text{kHz}}{\text{MHz}}$ » на требуемый поддиапазон частот;

– ручкой «ЧАСТОТА $\frac{\text{kHz}}{\text{MHz}}$ » указатель шкалы на требуемую частоту;

– переключатель ΔQ-Q в положение «Q»;

– тумблер «ИЗМЕРЕН.–КАЛИБР. Q» в положение «КАЛИБР. Q»;

– ручкой «КАЛИБР. Q» стрелку измерительного прибора точно на риск под знаком «∇»;

– тумблер ИЗМЕРЕНИЕ-КАЛИБРОВКА Q вернуть в положение «ИЗМЕРЕН.».

И.5.2 Измерение индуктивности

Для измерения индуктивности L резонансным методом необходимо:

– подключить измеряемую катушку индуктивности к клеммам «L_X»;

– установить частоту f_p , на которой будет производиться измерение;

– установить переключатель «ПРЕДЕЛЫ Q» в положение 30;

– изменением емкости образцового конденсатора настроить контур в резонанс (максимальное отклонение стрелки индикатора), изменяя при зашкаливании стрелки индикатора его чувствительность переключателем «ПРЕДЕЛЫ Q»;

– отсчитать по основной и нониусной шкалам полученное значение емкости образцового конденсатора C_0 и рассчитать измеренное значение индуктивности L по формуле

$$L = \frac{1}{(2\pi f_p)^2 C}$$

И.5.3 Измерение емкости

И.5.3.1 Для измерения емкости C_p резонансным методом необходимо:

– подключить заданную катушку индуктивности (из комплекта прибора) к клеммам «L_X» а измеряемую емкость – к клеммам «C_X»;

– установить минимальное значение емкости образцового конденсатора C_{\min} (30 пФ);

– изменяя частоту генератора прибора, настроить контур в резонанс;

– отсчитав по шкале значение резонансной частоты f_p , и, зная значение индуктивности L , определить емкость контура по формуле

$$C_K = \frac{1}{(2\pi f_p)^2 \cdot L},$$

определить искомое значение емкости C_P как разность емкостей C_K и C_{\min} :

$$C_P = C_K - C_{\min}.$$

И.5.3.2 Для измерения емкости C_3 методом замещения необходимо:

- подключить к клеммам «L_X» прибора заданную катушку индуктивности (из комплекта прибора);
- установить максимальное значение емкости образцового конденсатора C_{\max} (450 пФ) и изменением частоты генератора настроить образованный контур в резонанс;
- подключить к клеммам «C_X» прибора измеряемый конденсатор и восстановить резонанс изменением емкости образцового конденсатора;
- отсчитать значение емкости образцового конденсатора прибора C_0 и определить искомую емкость C_3 по формуле

$$C_3 = C_{\max} - C_0.$$

И.5.4 Измерение полного сопротивления двухполюсников

Для измерения полного сопротивления и добротности двухполюсников необходимо:

- подключить заданную катушку индуктивности к клеммам «L_X»;
- установить частоту f , на которой будет производиться измерение;
- провести калибровку прибора согласно подразделу И.5.1;
- изменением емкости образцового конденсатора настроить контур в резонанс и отсчитать по шкалам измерительного прибора и образцового конденсатора полученные величины Q_1 и C_1 ;
- подключить исследуемый двухполюсник к клеммам «C_X»;
- настроить образованный контур в резонанс изменением емкости образцового конденсатора и отсчитать новые значения Q_2 и C_2 ;
- рассчитать значения активного, реактивного сопротивлений и добротности исследуемого двухполюсника по формулам:

$$R = \frac{Q_1 Q_2}{2\pi f (C_2 Q_1 - C_1 Q_2)}; \quad X = \frac{1}{2\pi f (C_2 - C_1)}; \quad Q = \frac{(C_1 - C_2) \cdot Q_1 \cdot Q_2}{C_1 \cdot (Q_1 - Q_2)};$$

- с учетом полученного характера реактивности (емкостный или индуктивный) рассчитать значения C или L .

Если после подключения двухполюсника получить резонанс не удастся, то необходимо изменить частоту измерения или подобрать другую катушку и повторить измерения.

После окончания измерений перевести тумблер «СЕТЬ» в нижнее положение.

ПРИЛОЖЕНИЕ К

(обязательное)

АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА СК4-58

К.1 Назначение

Анализатор спектра СК4-58 предназначен для панорамного наблюдения спектра и измерения:

- параметров спектра периодических непрерывных колебаний сложной формы (АМ, ЧМ, ФМ), паразитных и побочных спектральных составляющих;
- ширины занимаемой полосы и внеполосных спектров;
- уровней и частот составляющих спектра сигналов и частотных интервалов между ними;
- нелинейных искажений четырехполосников по уровню гармоник и интермодуляционных искажений третьего порядка;
- коэффициента передачи четырехполосников в диапазоне частот.

К.2 Технические и метрологические характеристики

К.2.1 Диапазон рабочих частот анализатора спектра от 0,4 до 600 кГц перекрывается тремя поддиапазонами: 0,4–200 кГц; 200–400 кГц; 400–600 кГц. Перестройка по частоте обеспечивается в двух режимах работы:

– в режиме ручной перестройки частоты с помощью ручек «ЧАСТОТА ГРУБО», «ЧАСТОТА ПЛАВНО» (переключатель «ОБЗОР кHz» в положении «0»);

– в режиме автоматической перестройки по частоте с номинальной полосой обзора, регулируемой дискретно с шагом 1, 2, 5 от 200 Гц до 200 кГц (переключатель «ОБЗОР кHz» в положении «НА ДЕЛЕН.»).

К.2.2 Погрешность измерения частоты входного сигнала в диапазоне частот 0,4–600 кГц не превышает значения

$$\pm \left(10^{-4} + F + f + \frac{1}{T} \right),$$

где F – измеряемая частота, Гц;

f – полоса пропускания, Гц, устанавливаемая переключателем «ПОЛОСА кHz»;

T – время счета, с (определяется положением тумблера «ВРЕМЯ СЧЕТА, s» и составляет 1 или 0,1 с).

К.2.3 Составляющие погрешности измерения уровня входного сигнала не превышают значений, указанных в таблице К.1.

К.2.4 Конечное значение амплитудных шкал индикатора устанавливается ступенчато через 10 дБ в следующих пределах:

- линейная шкала, от 80 нВ до 80 мВ;
- логарифмическая шкала от минус 80 дБ до плюс 10 дБ.

К.2.5 Полоса пропускания на уровне 3 дБ принимает значения (0,1; 0,3; 1,0; 3,0) кГц.

К.2.6 Погрешность номинальных значений полос пропускания (0,1; 0,3; 1,0) кГц не более $\pm 30\%$ и не более $\pm 40\%$ для полосы пропускания 3 кГц.

К.2.7 Анализатор обеспечивает три вида развертки:

а) внутренняя развертка со следующими способами запуска:

– «одинач.» – одиночный запуск;

– «авт.» – автоматический запуск;

– «сеть» – автоматический запуск с внутренней синхронизацией от сети.

б) ручная развертка;

в) внешняя развертка напряжением от 0 до 8 В обеспечивается подачей напряжения на разъем «РАЗВЕРТКА» индикатора.

Таблица К.1

| Составляющие погрешности | Значение погрешности |
|--|----------------------|
| Погрешность относительного ослабления аттенюатора «ОСЛАБЛЕНИЕ дБ», дБ | - 0,25 (3 %) |
| Погрешность относительного ослабления аттенюатора «НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ», % – для первых шести положений; – для седьмого и восьмого положения | ± 4 ± 6 |
| Погрешность относительного ослабления плавного аттенюатора «НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ» на оцифрованных отметках, % | ± 12 |
| Приведенная погрешность шкалы индикатора в линейном масштабе, % | ± 4 |
| Погрешность логарифмической шкалы в диапазоне амплитуд от 0 до минус 70 дБ, дБ | ± 2 |

К.2.8 Входное сопротивление 50 ± 5 Ом, 600 ± 60 Ом, 100 ± 10 кОм. Входная емкость не более 100 пФ.

К.2.9 В анализаторе обеспечивается три режима индикации изображения на экране ЭЛТ, устанавливаемых переключателем «ПАМЯТЬ»:

– «ОТКЛ.» – режим с отключением памяти. Индикатор работает в осциллографическом режиме (без запоминания);

– «ПЕРИОД» – режим с периодической записью и стиранием изображения. Запись изображения происходит за время прямого хода развертки, стирание – во время обратного хода;

– «ДЛИТ.» – режим с длительной памятью. На экране непрерывно записывается и сохраняется изображение. Время хранения памяти не менее 100 с. При нажатии кнопки «X» производится стирание записанного изображения.

К.2.10 Диаметр луча в пределах масштабной сетки экрана ЭЛТ при пониженной яркости свечения не более 1 мм.

К.3 Принцип работы анализатора

В анализаторе спектра СК4-58 реализуется метод последовательного анализа спектра с двукратным преобразованием частоты исследуемого сигнала и происходит образование следящего сигнала с помощью гетеродинов, которые используются для преобразования входного сигнала в сигнал промежуточной частоты.

Структурная схема, поясняющая принцип действия анализатора спектра, приведена на рисунке К.1.



Рисунок К.1 – Упрощенная структурная схема анализатора спектра СК4-58

Входной сигнал $F_{СИГН}$ после предварительного усиления в блоке низкой частоты Я4С-56 с помощью опорного кварцевого гетеродина преобразуется в преобразователе частоты 1 в сигнал первой промежуточной частоты в соответствии с уравнением преобразования

$$F_{ПЧ} = \pm(mF_{Г1} \pm nF_{СИГН}),$$

где $F_{ПЧ}$, $F_{Г1}$ и $F_{СИГН}$ – частоты промежуточная, гетеродинная, входного сигнала соответственно, m и $n = 1, 2, 3, \dots$

Использование входной фильтрации и фильтров на первой промежуточной частоте позволяет подавить комбинационные и зеркальные частоты и выделить сигнал разностной частоты

$$F_1 = F_{Г1} - F_{СИГН}.$$

В анализаторе преобразование входных сигналов в сигналы промежуточной частоты $F1$ происходит с повышением частоты. Преобразование частоты «вверх» на первую промежуточную частоту позволяет избежать множества комбинационных составляющих, сопровождающих преобразование. Например, сигнал частотой 100 кГц будет преобразовываться в сигнал первой промежу-

точной частоты F_1 , равной 50 МГц, при частоте гетеродина 50,1 МГц. Частота первого гетеродина $F_{Г1}$ фиксирована и стабилизирована кварцевым резонатором и может ступенчато изменяться с помощью переключателя диапазона, принимая значения (50,1; 50,3; 50,5) МГц. Опорные генераторы первого гетеродина участвуют в образовании поддиапазонов анализатора спектра.

Второй гетеродин $Г2$ работает в блоке промежуточной частоты Я4С-54 на частоте 47 МГц и может перестраиваться по частоте в пределах ± 100 кГц напряжением управления $E_{УПР}$. Гетеродин $Г2$ позволяет получить перестройку анализатора спектра по частоте внутри поддиапазона и участвует в образовании следящего сигнала.

В результате перестройки частоты второго гетеродина $Г2$ сигналы первой промежуточной частоты F_1 в пределах включенного поддиапазона последовательно преобразуются в преобразователе частоты 2 в сигнал второй промежуточной частоты F_2 , равной 3 МГц. На второй промежуточной частоте осуществляется основное усиление сигнала и формирование полос пропускания.

Продетектированный входной сигнал и напряжение управления вторым гетеродином поступают на индикаторный блок ЯЧ0-0830. Напряжение управления вторым гетеродином $Г2$ с выхода генератора развертки $Г3$ прикладывается к пластинам горизонтального отклонения луча ЭЛТ. Изображение на экране ЭЛТ представляет собой зависимость амплитуд спектральных составляющих исследуемого сигнала от частоты.

Для исследования амплитудно-частотных характеристик различных четырехполюсников в динамическом диапазоне до 140 дБ используется выходной сигнал следящего генератора. Он представляет собой генератор стандартных сигналов с калиброванным выходным уровнем и частотой настройки.

Для образования следящего сигнала сигнал одного из опорных кварцевых генераторов $Г1$ с помощью второго гетеродина $Г2$ частоты $47 \pm 0,1$ МГц преобразуется в преобразователе 3 в сигнал частотой 3–3,6 МГц. Кварцевый генератор $Г4$ работает на частоте 3 МГц, равной центральной частоте усилителя промежуточной частоты (УПЧ) блока промежуточной частоты.

В преобразователе частоты 4 в результате взаимодействия выходного сигнала генератора $Г4$ и сигнала преобразователя частоты 3 (3–3,6) МГц образуется сигнал, частота которого равна частоте настройки анализатора спектра по входу (0,4–600) кГц. После фильтрации и усиления следящий сигнал поступает на выходной разъем «0,4 – 600 kHz» и блок измерения частоты.

Внешний вид прибора и расположение основных органов управления на передних панелях его блоков приведены на рисунке К.2.

К.4 Подготовка анализатора к работе

Установить органы управления и контроля в следующие положения:

| | |
|-----------------------------|------------|
| Переключатель ОСЛАБЛЕНИЕ dB | 50 |
| Переключатель ОБЗОР kHz | НА ДЕЛЕН 5 |
| Переключатель ПОЛОСА kHz | 3 |

| | |
|--------------------------------------|--------------------------|
| Переключатель УРОВЕНЬ dBv | 0 |
| Ручка УРОВЕНЬ dBv плавно | КАЛИБР. |
| Тумблер ВНЕШ ВНУТР | ВНУТР |
| Ручка МЕТКА | крайнее правое положение |
| Тумблер ВРЕМЯ СЧЕТА s | 0,1 |
| Переключатель входного сопротивления | 100 кОм |
| Кнопки ПАМЯТЬ | ОТКЛ. |
| Переключатель РАЗВЕРТКА СКОРОСТЬ | 10 мS/Дел |
| Тумблер масштаба ЛИНЕЙН ЛОГ | ЛИНЕЙН |
| Ручка НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ | 0 дБ |
| Видеофильтр | ВЫКЛ. |
| Ручка ГАШЕНИЕ ЛИНИИ УРОВЕНЬ | крайнее левое положение |
| Переключатель ВИД | ВНУТР. |
| Переключатель ЗАПУСК | АВТ. |

Остальные органы управления могут находиться в произвольном положении.



Рисунок К.2 – Внешний вид СК4-58

К.5 Проведение измерений

К.5.1 Переключатель «ДИАПАЗОН kHz» установить в положение, соответствующее ожидаемой частоте основной гармоники анализируемого сигнала. Вращением ручки «МЕТКА» яркостную метку на экране ЭЛТ установить в центр экрана.

Вращением ручек «ЧАСТОТА ГРУБО» «ЧАСТОТА ПЛАВНО» установить изображение анализируемого спектра в центр экрана, уменьшая при необходимости ослабление ступенчатого аттенюатора «ОСЛАБЛЕНИЕ dB», если

спектр сигнала на экране отсутствует.

Переключатель «ПАМЯТЬ» перевести в положение «ПЕРИОДИЧ.».

Переключатели «ПОЛОСА кГц» и «РАЗВЕРТКА/СКОРОСТЬ» установить в положения «0,1 кГц» и «0,2 s/ДЕЛ» соответственно. Регулировкой ослабления ступенчатого «ОСЛАБЛЕНИЕ dB» и плавного «НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ЛОГ» аттенюаторов добиться, чтобы амплитуда основной гармоники анализируемого сигнала не превышала восьми делений на экране ЭЛТ. Ручками «Фокус» и «Яркость» добиться оптимального изображения спектра сигнала.

К.5.2 Измерение частоты

Частота интересующего спектрального компонента определяется по встроенному частотомеру с использованием яркостной метки. При этом частотомер отсчитывает частоту того места линии развертки на экране индикатора, где находится метка.

Например, установив ручкой «МЕТКА» яркостную метку в точку экрана, соответствующую основной гармонике спектра, по шкале частотомера отсчитать значение f_0 .

К.5.3 Измерение относительных уровней спектральных составляющих

Относительная амплитуда интересующего спектрального компонента может измеряться в двух режимах градуировки вертикальной оси анализатора спектра – линейном и логарифмическом, выбираемом тумблером масштаба «ЛИНЕЙН ЛОГ».

Например, выбрать линейный режим градуировки вертикальной оси, для этого тумблер масштаба «ЛИНЕЙН ЛОГ» установить в положение «ЛИНЕЙН». Методика измерения уровня первой нижней боковой составляющей относительно амплитуды основной гармоники анализируемого спектра состоит в следующем:

– регулировкой ослабления ступенчатого «ОСЛАБЛЕНИЕ dB» и плавного аттенюаторов «НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ЛОГ» установить амплитуду основной гармоники анализируемого сигнала равной восьми делениям масштабной сетки ЭЛТ. Отсчитать значения ступенчатого A_0 и плавного a_0 аттенюаторов;

– затем регулировкой ослабления ступенчатого «ОСЛАБЛЕНИЕ dB» и плавного аттенюаторов «НОМИНАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ЛОГ» установить амплитуду первой нижней боковой составляющей анализируемого сигнала равной восьми делениям масштабной сетки ЭЛТ. Отсчитать значения ступенчатого A_H и плавного a_H аттенюаторов;

– рассчитать уровень нижней боковой составляющей относительно амплитуды основной гармоники анализируемого спектра по формуле

$$U_H = (A_0 + a_0) - (A_H + a_H).$$

Уровень первой верхней боковой составляющей относительно амплитуды основной гармоники анализируемого спектра U_B в линейном режиме измеряется по той же методике.

ПРИЛОЖЕНИЕ Л (обязательное)

ИЗМЕРИТЕЛЬ МОДУЛЯЦИИ СКЗ-43

Л.1 Назначение

Измеритель модуляции СКЗ-43 предназначен для измерения пиковых значений девиации частоты и коэффициента амплитудной модуляции (КАМ).

Л.2 Технические и метрологические характеристики

Л.2.1 Диапазон несущих частот от 4 до 1000 МГц в режиме измерения девиации частоты и от 0,15 до 500 МГц в режиме измерения амплитудной модуляции.

Погрешность индикации частоты не превышает

$$\pm (0,005 f_c + 100 \text{ кГц} + \text{ед. счета}), \text{ кГц},$$

где f_c – несущая частота сигнала, равная ($f_{\text{ГЕТ}} - 1$ МГц);

$f_{\text{ГЕТ}}$ – частота гетеродина, отсчитываемая встроенным частотомером в МГц;

ед. счета – единица счета последнего разряда частотомера.

Л.2.2 Параметры в режиме измерения девиации частоты

Л.2.2.1 Пределы измерения девиации частоты от 1 до 500 кГц.

Л.2.2.2 Основная погрешность измерения девиации частоты в килогерцах не превышает величин, определяемых формулами:

– в диапазоне модулирующих частот от 0,4 до 5 кГц

$$\Delta_{\text{ОСН}} = \pm(0,05\Delta f + f_M);$$

– в диапазоне модулирующих частот от 0,03 до 0,4 кГц и от 5 до 20 кГц

$$\Delta_{\text{ОСН}} = \pm(0,08\Delta f + f_M);$$

– в диапазоне модулирующих частот от 20 до 60 кГц

$$\Delta_{\text{ОСН}} = \pm(0,15\Delta f + f_M),$$

где Δf – измеренное значение девиации в кГц;

f_M – среднеквадратичное значение уровня собственного фона и шума измерителя в Гц.

Л.2.2.3 Среднеквадратичные значения уровней собственного фона и шума прибора в зависимости от частоты исследуемого сигнала приведены в таблице Л.1.

Л.2.3 Параметры в режиме измерения амплитудной модуляции

Л.2.3.1 Пределы измерения КАМ от 1 до 100 %.

Л.2.3.2 Основная погрешность измерения коэффициента амплитудной модуляции в процентах при КАМ от 1 до 80 % не превышает значений, определяемых формулами:

– в диапазоне модулирующих частот от 0,4 до 6 кГц

$$\Delta_{\text{ОСН}} = \pm(0,05M + 0,5) \text{ при включенном фильтре } 20 \text{ кГц};$$

$$\Delta_{\text{ОСН}} = \pm(0,05M + 1,0) \text{ при включенном фильтре } 60 \text{ кГц};$$

– в диапазоне модулирующих частот от 0,03 до 0,4 кГц и от 6 до 20 кГц

$$\Delta_{\text{ОСН}} = \pm(0,08M + 0,5) \text{ при включенном фильтре } 20 \text{ кГц};$$

$$\Delta_{\text{ОСН}} = \pm(0,08M + 1,0) \text{ при включенном фильтре } 60 \text{ кГц};$$

– в диапазоне модулирующих частот от 20 до 60 кГц

$$\Delta_{\text{ОСН}} = \pm(0,1M + 1,0),$$

где М – измеренное значение КАМ, %.

Таблица Л.1

| Частота, МГц | Уровень входного сигнала, мВ | Полоса модулирующих частот, МГц | Среднеквадратичное значение уровня собственного фона и шума, Гц |
|----------------|------------------------------|---------------------------------|---|
| от 4 до 100 | 30 | 0,03–20,0 | 50 |
| | | 0,03–60,0 | 150 |
| от 100 до 250 | 30 | 0,03–20,0 | 100 |
| | | 0,03–60,0 | 300 |
| от 250 до 500 | 50 | 0,03–20,0 | 250 |
| | | 0,03–60,0 | 750 |
| от 500 до 1000 | 300 | 0,03–20,0 | 250 |
| | | 0,03–60,0 | 750 |

Л.2.3.3 Основная погрешность измерения КАМ от 80 до 95 % в диапазоне модулирующих частот от 0,4 до 6 не превышает $\pm 0,05 M$ %. Погрешность измерения КАМ свыше 95 % не нормируется.

Л.2.4 Промежуточная частота прибора в нормальных условиях 1000 ± 100 кГц.

Л.2.5 Входное сопротивление прибора 50 Ом при $K_{\text{СТУ}}$ не более 5 в диапазоне частот до 1000 МГц, где $K_{\text{СТУ}}$ – коэффициент стоячей волны по напряжению.

Л.3 Устройство и принцип работы прибора

Структурная схема измерителя модуляции приведена на рисунке Л.1.



Рисунок Л.1 – Структурная схема измерителя модуляции СКЗ-43

В диапазоне несущих частот 4–1000 МГц измеритель модуляции работает по принципу супергетеродинного приемника с однократным преобразованием

частоты сигнала в промежуточную частоту 1 МГц. В диапазоне несущих частот 0,15–4 МГц измеритель модуляции работает по принципу прямого усиления измеряемого сигнала.

Измерение девиации частоты основано на преобразовании модулированного по частоте сигнала промежуточной частоты в последовательность импульсов с постоянной амплитудой и длительностью, временное положение которых соответствует закону модуляции измеряемого ЧМ сигнала. Сигнал модуляции выделяется фильтром нижних частот и измеряется пиковым вольтметром.

Измерение КАМ (M) основано на методе двух вольтметров: измерение отношения пикового (U_M) значения положительной (+) или отрицательной (–) полуволн протектированного АМ сигнала к среднему (U_{CP}) значению протектированного АМ сигнала, которое поддерживается постоянным (и равным условной единице) схемой автоматической стабилизации уровня:

$$M(+)=\frac{\Delta U_m(+)}{DU_{cp}}, \quad M(-)=\frac{\Delta U_m(-)}{DU_{cp}}$$

Сигнал модуляции протектированного (детектор несущей) АМ сигнала выделяется фильтром низких частот (ФНЧ) и измеряется пиковым вольтметром.

Внутренний калибратор имитирует сигнал с калиброванной девиацией частоты, равной 500 кГц, и сигнал с коэффициентом амплитудной модуляции, равным 100 %, по которым производится установка коэффициента усиления, тракта измерения (калибровка прибора).

Индикация частоты выходного сигнала гетеродина осуществляется с помощью встроенного в прибор цифрового частотомера.

Внешний вид измерителя модуляции и расположение основных органов управления на передней панели блока приведены на рисунке Л.2.



Рисунок Л.2 – Внешний вид измерителя модуляции СК3-43

Л.4 Подготовка прибора к работе

Л.4.1 Установить органы управления в следующие положения:

– тумблер автоматической подстройки частоты (АПЧ) – в нижнее положение;

– переключатель «диапазоны МНz» – в положение «0,9–1,5».

Остальные органы управления могут находиться в произвольном положении.

Л.4.2 Тумблер «СЕТЬ» установить в верхнее положение. При этом должны засветиться цифровые индикаторы прибора и индикаторная лампочка «МАЛО».

Л.5 Проведение измерений с прибором

Л.5.1 Измерение девиации частоты.

Л.5.1.1 Выбрать нужную полосу по модулирующим частотам переключением тумблера «ПОЛОСА кНz 20, 60». Необходимо помнить, что максимальное количество воспроизводимых прибором гармоник равно целой части отношения 60 к частоте первой гармоники модулирующего сигнала.

Л.5.1.2 Поставить тумблер «М %, Δf кНz» в положение « Δf кНz».

Л.5.1.3 Поставить тумблер «МОДУЛ.» в положение «+» или «-» в зависимости от необходимости измерения положительной или отрицательной полу волны модулирующего напряжения.

Л.5.1.4 Настройка прибора на измеряемый параметр производится следующим образом (независимо от режима работы):

– подать на разъем «2,5V МАКС» измеряемый ВЧ сигнал с уровнем, не превышающим 2,5 В и не ниже чувствительности прибора;

– поставить переключатель «ДИАПАЗОНЫ МНz» в нужное положение;

– на участках 16–60 МГц и 170–1000 МГц настройка производится на гармониках гетеродина (при этом следует выбирать меньший номер гармоники). Вращением ручки «НАСТРОЙКА» против часовой стрелки от правого упора добиться засвечивания всех индикаторных лампочек «МАЛО», «МНОГО». При этом при нажатии кнопки «КОНТРОЛЬ ГЕТЕP» цифровые индикаторы должны высвечивать примерно частоту гетеродина, отличающуюся от частоты сигнала на 1 МГц. Продолжая медленное вращение ручки «НАСТРОЙКА», добиться засвечивания индикаторных лампочек «ВЫШЕ», «НИЖЕ». При засвеченной лампочке «ВЫШЕ» частоту гетеродина необходимо уменьшить, а при засвеченной лампочке «НИЖЕ» – увеличить.

Л.5.1.5 Отсчитать по цифровому индикатору измеренное значение девиации частоты.

Л.5.2 Измерение коэффициента амплитудной модуляции

Л.5.2.1 Установить тумблер «М %, f кНz» в положение «М %».

Л.5.2.2 Прodelать операции аналогично пунктам Л.5.1.3, Л.5.1.4 и отсчитать по цифровому индикатору значение коэффициента АМ.

Для уменьшения погрешности измерения малых значений КАМ (< 5 %) необходимо при выключенной модуляции измеряемого объекта установить уровень измеряемого сигнала таким, при котором показания цифрового индикатора будут минимальными.

ПРИЛОЖЕНИЕ М (обязательное)

ИЗМЕРИТЕЛЬ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ С6-5

М.1 Назначение

Измеритель нелинейных искажений С6-5 предназначен для измерения коэффициента гармоник.

М.2 Технические и метрологические характеристики

М.2.1 Диапазон частот исследуемых сигналов при измерении коэффициента гармоник 20 Гц–200 кГц, перекрываемый восемью поддиапазонами. Диапазон входных напряжений 0,1–100 В.

М.2.2 Диапазон измеряемых коэффициентов гармоник 0,03–100 % с разбивкой на семь шкал.

М.2.3 Пределы основной погрешности измерения коэффициента гармоник приведены в таблице М.1.

Таблица М.1

| Диапазон частот | Погрешность, % | |
|-----------------|----------------------------|--------------------|
| | При $K_{Г} < 30$ % | При $K_{Г} > 30$ % |
| 20 Гц–20 кГц | $\pm (0,05 K_{ПР} + 0,02)$ | $0,15 K_{Г}$ |
| 20 кГц–200 кГц | $\pm (0,1 K_{ПР} + 0,1)$ | $0,25 K_{Г}$ |

Примечание – $K_{ПР}$ – значение предела соответствующей шкалы, %;
 $K_{Г}$ – измеренное значение коэффициента гармоник, %.

М.3 Устройство и принцип работы прибора

Принцип работы прибора С6-5, структурная схема которого представлена на рисунке М.1, основан на раздельном измерении среднеквадратичного значения напряжения исследуемого сигнала и среднеквадратичного значения напряжения высших гармоник этого же сигнала.

В режиме калибровки кнопка «КАЛИБР.» переключателя рода работ нажата, исследуемый сигнал со входа прибора поступает на вход вольтметра прибора через входной аттенюатор, входной усилитель и режекторный усилитель. Ручкой «КАЛИБР.» напряжение входного сигнала устанавливается равным условно выбранной единице (отметка «10» на шкале $K_{Г}$ с верхним пределом 100 %).

В режиме измерения коэффициента гармоник кнопка $K_{Г}$ переключателя рода работ нажата, исследуемый сигнал дополнительно проходит через режекторный фильтр (мост Вина) и усилитель гармоник. В этом случае на вход вольтметра поступает напряжение высших гармоник исследуемого сигнала.

Для подавления напряжения основной гармоники во всем диапазоне частот исследуемых сигналов предусмотрена схема коммутации элементов моста

Вина, обеспечивающая переключение поддиапазонов частот и плавную настройку (балансировку моста) в пределах каждого поддиапазона.

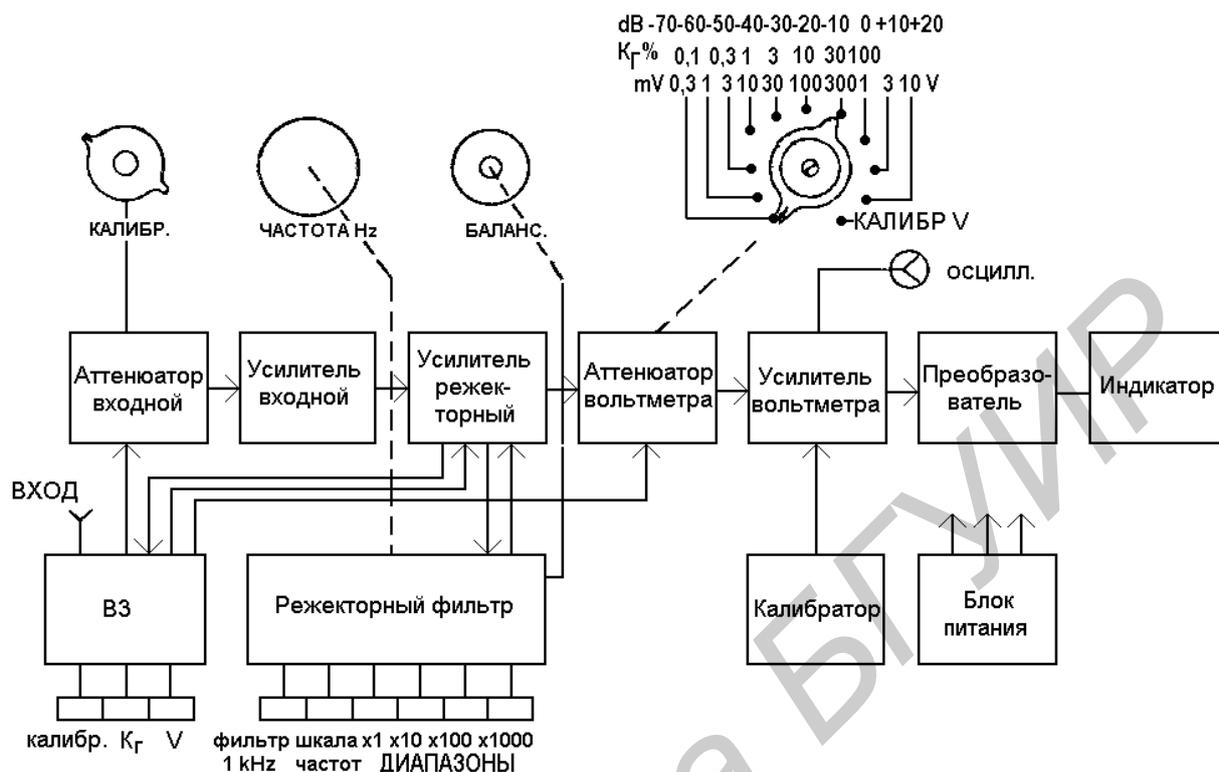


Рисунок М.1 – Структурная схема измерителя нелинейных искажений С6-5

Показания прибора пропорциональны отношению среднеквадратичного значения напряжения высших гармоник исследуемого сигнала к среднеквадратичному значению напряжения исследуемого сигнала.

При использовании прибора в режиме вольтметра необходимо нажать кнопку «V» переключателя рода работ. В этом случае напряжение исследуемого сигнала подается непосредственно на вход вольтметра прибора.

Внешний вид измерителя нелинейных искажений и расположение органов управления на его передней панели приведены на рисунке М.2.

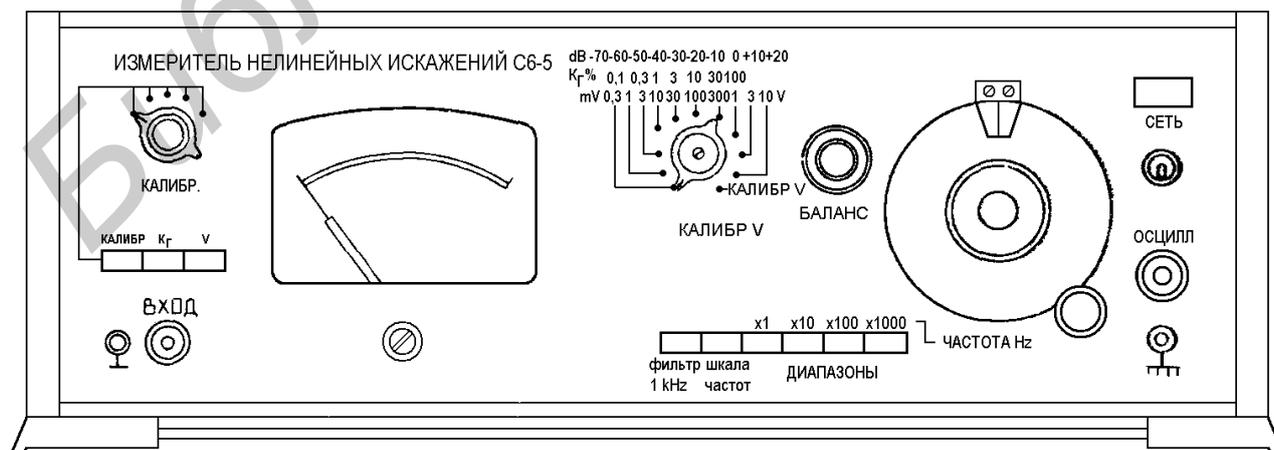


Рисунок М.2 – Внешний вид измерителя нелинейных искажений С6-5

М.4 Подготовка прибора к работе

М.4.1 Установить органы управления прибором в следующие положения:

- переключатель рода работ – в положение «КАЛИБР.»;
- переключатель пределов измерения – в положение 100 % по шкале « K_T %»;
- переключатель и ручку «КАЛИБР.» – в среднее положение;
- переключатели «ШКАЛА ЧАСТОТ» и «ДИАПАЗОНЫ» – в положения, соответствующие ожидаемой частоте сигнала.

М.4.2 Включить прибор, переведя тумблер «СЕТЬ» в верхнее положение, и произвести калибровку прибора. Для этого переключателем и ручкой «КАЛИБР.» установить стрелку индикатора на отметку 10 шкалы 100 %.

М.5 Проведение измерений

Переключатель рода работ установить в положение « K_T ». Добиться минимального отклонения стрелки индикатора последовательной регулировкой ручек «ЧАСТОТА Hz» и «БАЛАНС», увеличивая с помощью переключателя пределов измерения чувствительность прибора. Полученное минимальное показание прибора соответствует значению $K_{ни}$ в процентах.

Для получения отсчета K_T в дБ необходимо произвести перекалибровку прибора на отметку 0 дБ (нижняя шкала индикатора) при положении переключателя пределов измерения 0 дБ. После этого перейти в режим измерения путем нажатия кнопки « K_T » и, установив необходимый предел измерения, отсчитать измеренное значение коэффициента гармоник как сумму показаний шкал индикатора и переключателя пределов измерения в децибелах.

ПРИЛОЖЕНИЕ Н (обязательное)

ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ Г4-107

Н.1 Назначение

Генератор Г4-107 является источником немодулированных и модулированных сигналов высокой частоты и предназначен для использования при контроле, регулировке и настройке различных радиотехнических устройств.

Н.2 Технические и метрологические характеристики

Н.2.1 Прибор обеспечивает следующие виды работ:

- непрерывная генерация (НГ);
- амплитудная модуляция синусоидальным напряжением (АМ);
- частотная модуляция синусоидальным напряжением (ЧМ) без отчета значения девиации частоты;
- импульсная модуляция (ИМ).

Н.2.2 Частотные параметры (*F*-параметры):

- диапазон частот 12,5–400 МГц, перекрываемый пятью поддиапазонами;
- основная погрешность установки частоты не более ± 1 %;

Н.2.3 Параметры выходного напряжения (*U*-параметры) генератора в режиме «НГ»:

- выходное напряжение на согласованной нагрузке (50 ± 1) Ом, подключаемой через кабель к основному выходу генератора «dBV», регулируется в пределах $1-10^{-5}$ В;

- основная погрешность установки опорного значения выходного напряжения не превышает ± 1 дБ;

- регулировка выходного напряжения производится с помощью внутреннего аттенюатора от 0 до 119 дБ ступенями через 1 дБ и плавно в пределах каждой ступени;

- основная погрешность ослабления внутреннего аттенюатора не превышает $\pm 0,8$ дБ в диапазоне частот до 200 МГц и $\pm 1,5$ дБ в диапазоне свыше 200 МГц.

Н.2.4 Параметры амплитудной модуляции (АМ параметры):

- амплитудная модуляция осуществляется сигналом частотой 1 кГц от внутреннего источника модуляции;

- коэффициент амплитудной модуляции регулируется в пределах 0–90% ступенями через 10 %;

- основная погрешность установки коэффициента амплитудной модуляции не превышает ± 5 % при $10 \% < M < 50 \%$ и ± 10 % при $50 \% < M < 90 \%$;

- выходное напряжение генератора в режиме «АМ» составляет 0,5 от уровня выходного напряжения в режиме «НГ».

Н.2.5 Параметры частотной модуляции (*FM*-параметры):

- частотная модуляция осуществляется сигналом частотой 1 кГц от внутреннего источника модуляции;
- максимальное значение девиации частоты в режиме внутренней ЧМ не менее (8, 16, 32, 64 и 128) кГц в соответствующих поддиапазонах частот;
- уровень выходного напряжения в режиме «ЧМ» соответствует уровню напряжения в режиме «НГ».

Н.3 Устройство и принцип работы генератора

Структурная схема генератора приведена на рисунке Н.1 и состоит из четырех основных функциональных элементов, обеспечивающих установку и отсчет частоты сигнала, уровня выходного напряжения и коэффициента амплитудной модуляции.

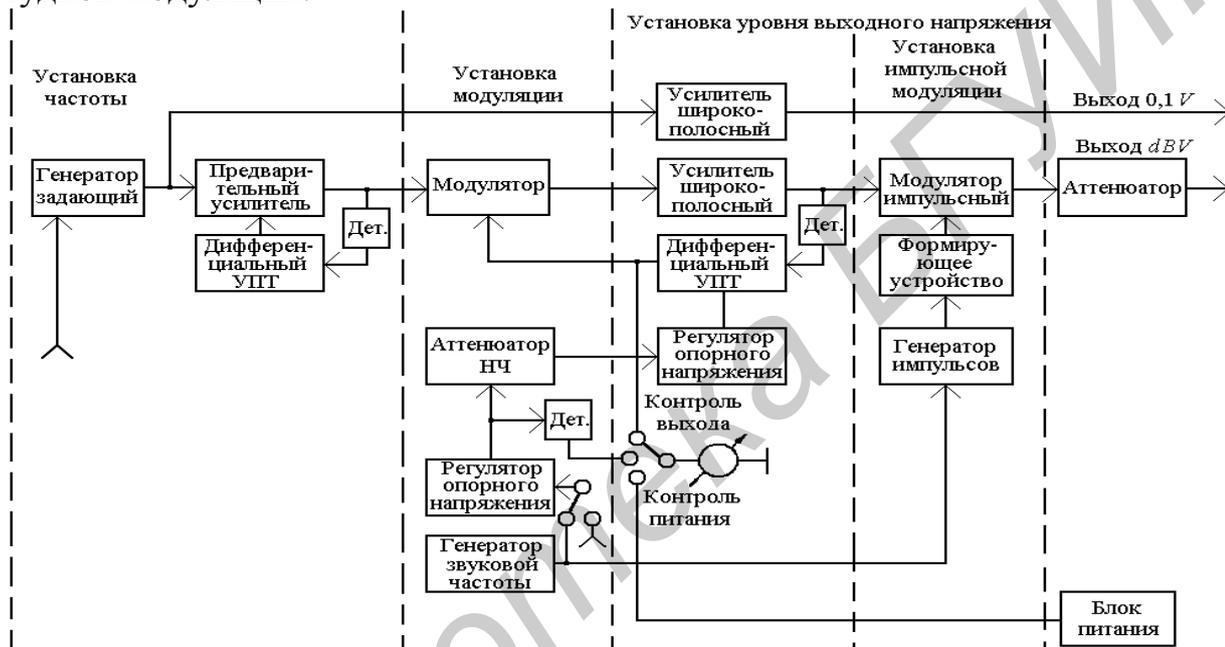


Рисунок Н.1 – Структурная схема генератора Г4-107

Установка и отсчет частоты сигнала производится в задающем генераторе, который определяет все частотные параметры прибора.

Установка и отсчет уровня выходного напряжения обеспечивается с помощью широкополосного усилителя, аттенюатора, детектора (Дет.) и дифференциального усилителя постоянного тока (УПТ) с регулируемым опорным напряжением, расположенных в основном канале прибора. Выходной сигнал выпрямляется детектором и поступает на вход дифференциального УПТ. На второй вход УПТ подается сигнал от регулятора опорного напряжения. Усиленная разность этих сигналов изменяет сигнал на входе широкополосного усилителя, обеспечивая пропорциональность уровня выходного напряжения основного канала генератора опорному напряжению. Таким образом, при постоянном опорном напряжении обеспечивается стабилизация уровня выходного напряжения генератора, а при его изменении – плавная регулировка выходного напряжения в пределах 1 дБ. Ступенчатая

регулировка через 1 дБ осуществляется с помощью выходного аттенюатора.

Установка глубины амплитудной модуляции обеспечивается высокочастотным модулятором (аттенюатор на *p-i-n* диодах) и низкочастотными узлами, с помощью которых формируется калиброванный модулирующий сигнал: генератор звуковой частоты, регулятор напряжения с детектором, позволяющий с помощью индикаторного прибора установить определенное опорное значение модулирующего сигнала, и аттенюатор НЧ, обеспечивающий дискретную регулировку глубины модуляции ступенями через 10 %.

Частотная модуляция сигнала генератора осуществляется путем электронной перестройки частоты задающего генератора с помощью варикапов, на которые подается модулирующий сигнал генератора звуковой частоты. Уровень этого сигнала, устанавливаемый регулятором напряжения и аттенюатором НЧ, определяет значение девиации частоты. Внешний вид прибора и расположение основных органов управления на передней панели приведены на рисунке Н.2.



Рисунок Н.2 – Внешний вид генератора сигналов Г4-107

Н.4 Подготовка прибора к работе

Н.4.1 Включить генератор и прогреть его в течение 15 мин. Нажать кнопки «АМ» и «ВНУТР». Вращением ручки установки опорного значения модулирующего сигнала установить стрелку индикаторного прибора на деление 50 мкА.

Н.4.2 Установить с помощью ручек регулировки ослабления ступенчатого и плавного аттенюаторов уровень выходного сигнала генератора 0 дБ.

Н.5 Проведение измерений с прибором

Н.5.1 Установка требуемого режима работы производится нажатием кнопок переключателя рода работ (АМ, ЧМ, ИМ).

Н.5.2 Необходимое значение частоты устанавливается нажатием кнопки

соответствующего поддиапазона и ручкой установки частоты « f ». При этом нижняя линейная шкала и деления на ободке ручки « f » служат нониусом для калибровки расстройки частоты относительно любой точки шкалы.

Н.5.3 Установка глубины амплитудной модуляции производится переключателем «ГЛУБИНА МОД %» ступенчато через 10 % и плавно ручкой установки опорного уровня.

Библиотека БГУИР

ЛИТЕРАТУРА

1 Метрология и радиоизмерения : учебник для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. проф. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2003.

2 Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учеб. пособие / под общ. ред. Б. Н. Тихонова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007.

3 Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах : учебник для вузов / В. И. Нефедов [и др.] ; под ред. проф. В. И. Нефедова. – М. : Высш. шк., 2001.

4 Дворяшин, Д. В. Метрология и радиоизмерения : учеб. пособие для студентов вузов по направлению подгот. дипломир. специалистов «Радиотехника» / Д. В. Дворяшин. – М. : Академия, 2005.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ
В ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В 2 частях

Часть 2

**Ляльков Святослав Владимирович
Гусынина Юлия Анатольевна
Ревин Валерий Тихонович**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *М. В. Гуртатовская*

Подписано в печать 09.04.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 7,09. Уч.-изд. л. 6,2. Тираж 100 экз. Заказ 175.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6