

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

Белорусский государственный университет

информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396.669

Со Тиха

**Определение восприимчивости к помехам радиолокационных приёмных  
трактов**

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 7-06-071303(радиосистемы и радиотехнологии)

\_\_\_\_\_ Со Тиха

Научный руководитель

Козел Виктор Михайлович

к.т.н., доцент

Минск 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Радиолокаторы различного назначения являются неотъемлемым элементом любой современной системы управления воздушным движением. К ним относятся обзорные (диспетчерские) радиолокаторы, посадочные, метеорологические и радиолокаторы обзора летного поля.

Наиболее важными из них являются обзорные (диспетчерские) и посадочные радиолокаторы, объединённые в радиолокационную систему посадки (РСП).

Основной задачей радиолокаторов РСП является обеспечение контроля и управления воздушным движением в районе аэродрома.

Целью диссертации является исследование и анализ восприимчивости приёмных трактов станций радиолокационной системы посадки к воздействию помех, создаваемых сетями связи 4G.

Основными задачами диссертации являются

- собор и обобщение данные по характеристикам радиолокационных систем посадки и систем связи 4G, определяющим их электромагнитную совместимость;
- разработка математических моделей спектральных характеристик сигнала 4G в математической среде *Matchcad*;
- разработка математических моделей линейной избирательности приёмных трактов станций РСП-10МН и РСП-6М2 в математической среде *Matchcad*;
- определение характеристик частотно-зависимого подавления помех от сети 4G приёмных трактов РСП-10МН и РСП-6М2 в математической среде *Matchcad*;
- определение критериев допустимого помехового воздействия РСП-10МН и РСП-6М2 от сети 4G;
- определение характеристик восприимчивости приёмных трактов РСП от воздействия помех от сети 4G;

Данная работа имеет как научную, так и практическую значимость, поскольку её результаты могут быть использованы для дальнейшего совершенствования систем радиосвязи и улучшения качества передачи информации в различных областях применения.

### Общая характеристика работы

#### 1. Собор и обобщение данные по характеристикам радиолокационных систем посадки и систем связи 4G, определяющим их электромагнитную совместимость

## 1.1. Описание методики определения восприимчивости приёмного тракта РСП

Для определения восприимчивости приёмных трактов РСП от сети связи 4G необходимо определить уровень помехи от сети 4G на приёмном тракте. Исходя из рекомендации МСЭ-R SM.337-6 [6], мощность помехи рассчитывается по формуле

$$I = P_t + G_t + G_r - L_b(d) - FDR(\Delta f) \text{ дБт}, \quad (1.1)$$

где  $P_t$  – мощность передатчика сети 4G (дБ);

$G_t$  – коэффициент усиления антенны сети 4G в направлении приемника РСП (дБи);

$G_r$  – коэффициент усиления антенны приемника РСП в направлении сети 4G (дБи);

$L_b(d)$  – основные потери передачи на расстоянии разнесения  $d$  между источником помехи и приемником (дБ) [7], что находится по формуле

$$L_b = 20 \cdot \log \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) + L_m, \quad (1.2)$$

где  $d$  – расстояние между приёмником и источником помех;

$\lambda$  – длина волны;

$L_m$  – потери относительно свободного пространства.

Ввиду сложности расчётов, связанный с пространственной ориентацией антенн и недостаточности данных физических процессов, принимаем

$P_t = 13,01 \text{ дБ}$ ,  $G_t = 20 \text{ дБи}$ ,  $G_{r\text{РСП}-10} = \text{дБи}$ ,  $G_{r\text{РСП}-6} = 29,54 \text{ дБи}$ ,  
 $d = 1 \text{ км}$ ,  $L_m = 60 \text{ дБ}$ .

Частотно-зависимое подавление  $FDR(\Delta f)$  является мерой подавления, создаваемого кривой избирательности приёмника в нежелательных спектрах излучения передатчика, и находится по формуле

$$FDR(\Delta f) = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{\infty} P(f) df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)| df} \text{ дБ} \quad (1.3)$$

где  $P(f)$  – эквивалентная спектральная плотность мощности сети 4G;  
 $H(f)$  – частотная характеристика приёмного тракта РСП;

$$\Delta f = f_t - f_r, \quad (1.4)$$

где  $f_t$  – частота настройки сети 4G;

$f_r$  – частота настройки приёмного тракта РСП.

## 1.2. Структура приёмного тракта РСП и его характеристики

Приёмное устройство ДРЛ функционально состоит из трёх каналов: амплитудного, фазового и автоподстройки частоты. Оно может работать в трёх режимах:

- приём одиночных сигналов с длительностью 2 мкс и частотой повторения 550 Гц (амплитудный канал);

К основным техническим характеристикам приёмного устройства относятся:

- чувствительность по амплитудному каналу - не менее -135 дБ/Вт (по абсолютной величине);
- промежуточная частота - 30 МГц;
- полоса пропускания по промежуточной частоте, не менее 0,8 МГц;

Амплитудный канал состоит из УВЧ, приемника, в состав которого входят:

- преселектор;
- гетеродин;
- смеситель канала сигнала;
- предварительный усилитель промежуточной частоты ПУПЧ;
- усилитель промежуточной частоты амплитудного канала УПЧ-А,
- видеоусилитель - дешифратор ВУ-ДШ;
- блок очистки от помех(БОП).

## 1.3. Характеристики излучения 4G

Для исследования возможных сценариев применения специфицированных диапазонов частот проанализируем требования к ширине частотных каналов, используемых абонентскими и базовыми станциями сети *LTE*, представленные в табл. 1.1 [16].

В отличие от стандартного частотного канала систем *UMTS* шириной 5 МГц частотные каналы *LTE* имеют возможность и механизмы масштабирования по ширине в пределах от 1,4 до 20 МГц в зависимости от профиля услугу абоненту.

На рис. 1.1 показана взаимосвязь между шириной частотного канала (*Channel bandwidth — BWChannel*) и конфигурацией полосы передаваемого сигнала (*Transmission bandwidth configuration — NRB*) [17]. Принятая в системах *LTE* ширина одного ресурсного блока *RB*, из которого формируется *OFDM*-сигнал, составляет 180 кГц. Границы каналов определяются как значение нижней и верхней несущих частот, разнесенных на половину ширины используемого частотного канала.

Таблица 1.1 – Конфигурация ширин полос частот 4G

Ширина полосы частот канала $BW_{Channel}$ [МГц]	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсных блоков $N_{RB}$	6	15	25	50	75	100

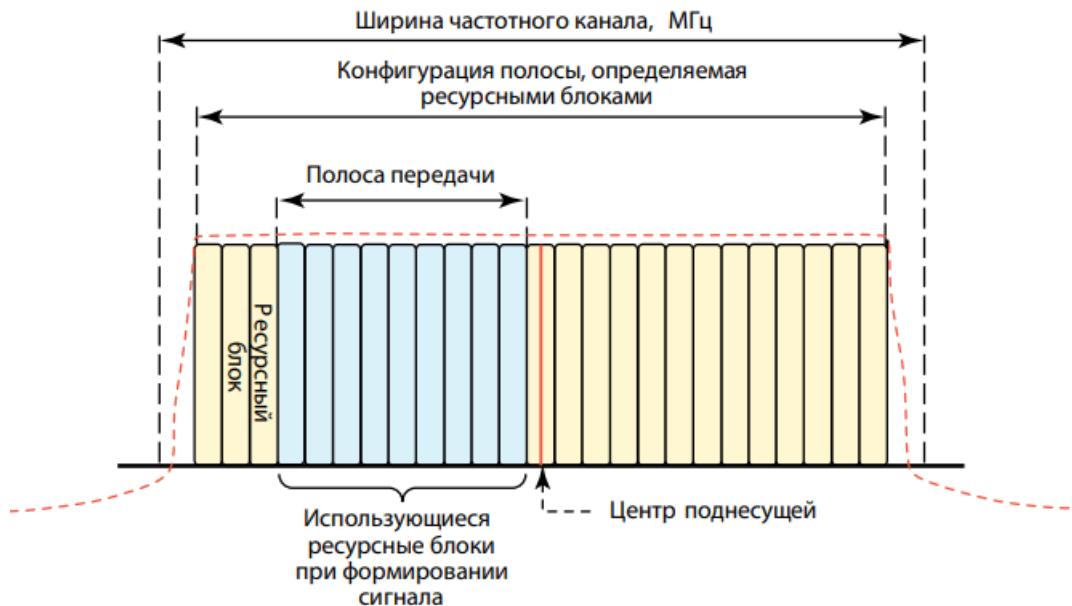


Рисунок 1.1 – Взаимосвязь между шириной частотного канала и конфигурацией полосы передаваемого сигнала

## 2. Разработка математических моделей спектральных характеристик сигнала 4G в математической среде Matchcad

Предельные уровни нежелательных излучений в рабочих полосах для БС сети 4G взяты из спецификации 36.104 [19] и представлены в таблицах 1.3 – 1.5.

Таблица 1.3 – Предельные уровни нежелательных излучений в рабочих полосах для БС, обслуживающих большие зоны, при полосе пропускания канала 1,4 МГц

Сдвиг частоты точки измерительного фильтра, $\Delta f$	Сдвиг центральной частоты измерительного фильтра, $f_{offset}$	Минимальные требования	Ширина полосы измерения
-3 дБ			

$<$ $0 \text{ МГц} \leq \Delta f < 1,4 \text{ МГц}$	$0,05 \text{ МГц} \leq f_{offset} < 1,45 \text{ МГц}$	$-1 \text{ дБм} - \frac{10}{1,4} \cdot \left( \frac{f_{offset}}{\text{МГц}} - 0,05 \right) \text{дБ}$	$10 \text{ кГц}$
$\Delta f < 1,4 \text{ МГц} \leq < 2,8 \text{ МГц}$	$1,45 \text{ МГц} \leq f_{offset} < 2,85 \text{ МГц}$	-11 дБм	$10 \text{ кГц}$
$\Delta f \leq 2,8 \text{ МГц} \leq \Delta f_{max}$	$2,85 \text{ МГц} \leq f_{offset} < f_{offsetmax}$	-16 дБм	$10 \text{ кГц}$

Таблица 1.4 – Предельные уровни нежелательных излучений в рабочих полосах для БС, обслуживающих большие зоны, при полосе пропускания канала 3 МГц

Сдвиг частоты точки измерительного фильтра, $\Delta f$	Сдвиг центральной частоты измерительного фильтра, $f_{offset}$	Минимальные требования	Ширина полосы измерения
$< 0 \text{ МГц} \leq \Delta f < 3 \text{ МГц}$	$0,05 \text{ МГц} \leq f_{offset} < 3,05 \text{ МГц}$	$-5 \text{ дБм} - \frac{10}{3} \cdot \left( \frac{f_{offset}}{\text{МГц}} - 0,05 \right) \text{дБ}$	$10 \text{ кГц}$
$3 \text{ МГц} \leq \Delta f < 6 \text{ МГц}$	$3,05 \text{ МГц} \leq f_{offset} < 6,05 \text{ МГц}$	-15 дБм	$10 \text{ кГц}$
$\leq 6 \text{ МГц} \leq \Delta f \leq \Delta f_{max}$	$6,05 \text{ МГц} \leq f_{offset} < f_{offsetmax}$	-16 дБм	$10 \text{ кГц}$

Таблица 1.5 – Предельные уровни нежелательных излучений в рабочих полосах для БС, обслуживающих большие зоны, при полосе пропускания канала 5, 10, 15 и 20 МГц

Сдвиг частоты точки –3 дБ измерительного фильтра, $\Delta f$	Сдвиг центральной частоты измерительного фильтра, $f_{offset}$	Минимальные требования	Ширина полосы измерения
$0 \text{ МГц} \leq \Delta f < 5 \text{ МГц}$	$0,05 \text{ МГц} \leq f_{offset} << 5,05 \text{ МГц}$	$-7 \text{ дБм} - \frac{7}{5} \cdot \left( \frac{f_{offset}}{\text{МГц}} - 0,05 \right) \text{ дБ}$	100 кГц
$5 \text{ МГц} \leq \Delta f < min(10 \text{ МГц}, \Delta f_{max})$	$5,05 \text{ МГц} \leq f_{offset} < min(10,05 \text{ МГц}, f_{offsetmax})$	-14 дБм	100 кГц
$10 \text{ МГц} \leq \Delta f \leq \Delta f_{max}$	$10,05 \text{ МГц} \leq f_{offset} << f_{offsetmax}$	-16 дБм	100 кГц

где  $\Delta f$  – разнос между граничной частотой канала и номинальной точкой –3дБ измерительного фильтра, ближайшей к несущей частоте;

$f_{offset}$  – разнос между граничной частотой канала и центром измерительного фильтра;

$f_{offsetmax}$  – сдвиг относительно частоты 10 МГц за пределами рабочей полосы частот на линии вниз;

$\Delta f_{max}$  – разность  $f_{offsetmax}$  и половины ширины измерительного фильтра.

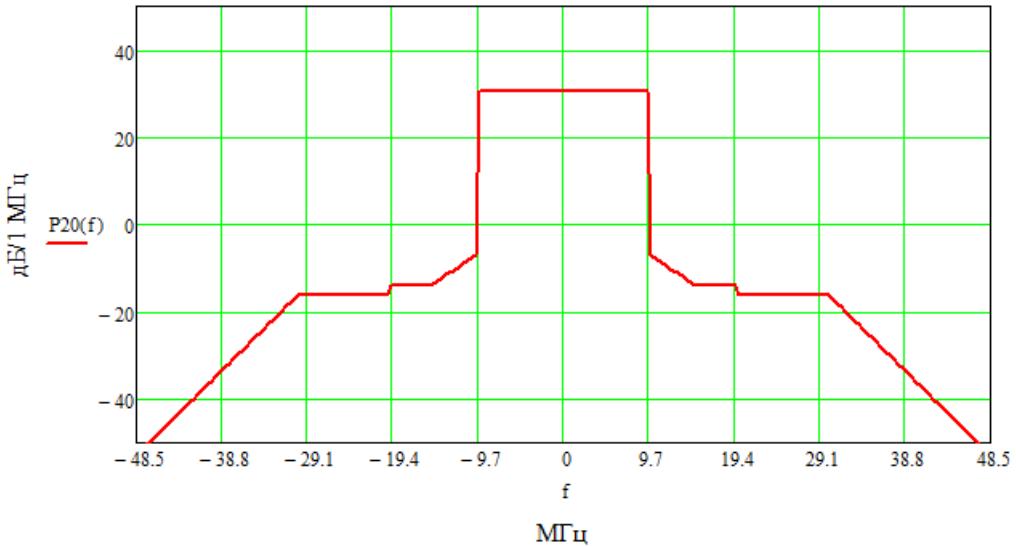
Вычислим функцию спектральной плотности, используя метод линейно-кусочной аппроксимации. Для этого используем данные из таблиц 1.3 – 1.5.

При ширине канала  $BW_{Channel} = 20 \text{ МГц}$  функция спектральной плотности имеет следующий вид:

$$P_{20}(f) = \begin{cases} 10 \cdot \log(P_{max} \cdot K_{bw}) \text{ при } 0 \leq |f| < \frac{\Delta f}{2}, \\ -7 - \frac{7 \cdot \left(|f| - \frac{\Delta f}{2}\right)}{5} \text{ при } \frac{\Delta f}{2} \leq |f| < \frac{\Delta f}{2} + 5, \\ -14 \text{ при } \frac{\Delta f}{2} + 5 \leq |f| < \frac{\Delta f}{2} + 10, \\ -16 \text{ при } \frac{\Delta f}{2} + 10 \leq |f| < \frac{\Delta f}{2} + 20, \\ -16 - \frac{10 \cdot \left(|f| - \frac{\Delta f}{2} - 20\right)}{5} \text{ при } |f| \geq \frac{\Delta f}{2} + 20. \end{cases} \quad (2.2)$$

Математические модели спектральной плотности имеют подобный вид и приведены полностью в тексте диссертации

Используя математическую среду Mathcad и подставив в неё алгоритм расчета спектральной плотности, были получены графики зависимости спектральной плотности, для примера на рисунке представлена спектральная плотность для сигнала с полосой 20МГц.



### 3. Разработка математических моделей линейной избирательности приёмных трактов станций РСП-10МН и РСП-6М2 в математической среде Matchcad

Математическая модель приёмного тракта станции РСП-10МН

Исходные данные к расчёту:

- промежуточная частота  $f_{пч} = 30$  МГц [20];
- ширина рабочей полосы  $\Delta f_{РСП-10МН} = 0,8$  МГц;
- число каскадов двухсвязных фильтров  $n = 5$ ;
- коэффициент связи между контурами  $\beta = 1$ ;

– расстройка частоты  $\Delta f = \pm 10$  МГц.

Находим обобщённую расстройку контуров по формуле

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta f}{d_3 \cdot f}, \quad (3.1)$$

где  $d_3$  – результирующее затухание контуров.

Принимаем  $d_3 = 0,03$ , при котором выполняется условие

$$\Delta f_{0,707} = \Delta f_{\text{РСП-10МН}} = 0,8 \text{ МГц}. \quad (3.2)$$

Находим коэффициент усиления одного каскада [21] по формуле

$$K_{\text{прРСП10}} = \frac{\beta}{d_3 \cdot \sqrt{(1 + \beta^2 - \xi^2)^2 + 4 \cdot \xi^2}}. \quad (3.3)$$

Находим общий коэффициент усиления по формуле

$$K_{\text{РСП10}} = (K_{\text{прРСП10}})^n. \quad (3.4)$$

где  $n = 5$  – число каскадов фильтра.

Используя математическую среду Mathcad, была построена характеристика частотной избирательности УПЧ станции РСП-10МН, представленная на рисунке 3.1.

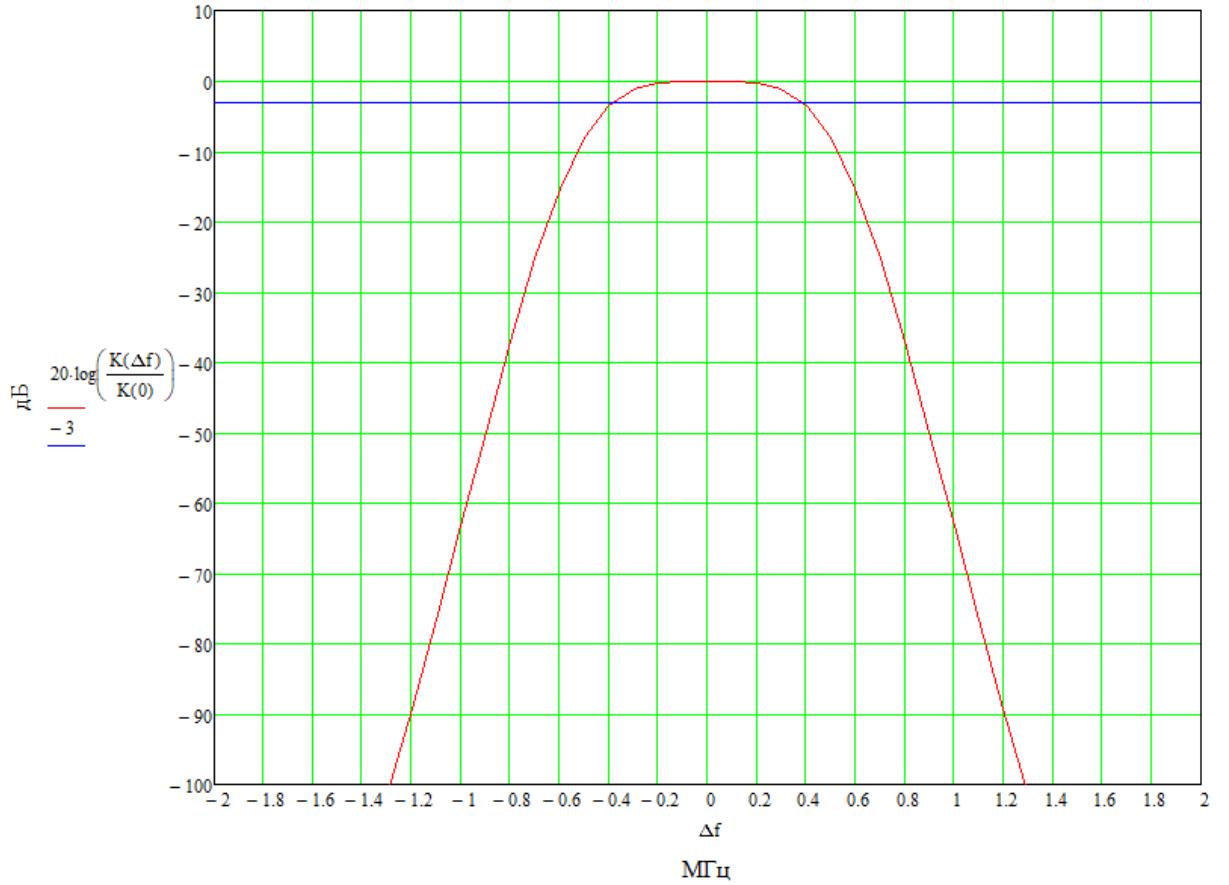


Рисунок 3.1 – Характеристика избирательности РСП-10МН

Математическая модель приёмного тракта станции РСП-6М2

Исходные данные к расчёту:

- промежуточная частота  $f_{\text{пч}} = 29 \text{ МГц}$  [22];
- ширина рабочей полосы  $\Delta f_{\text{РСП-6М2}} = 1,4 \text{ МГц}$ ;
- число каскадов двухсвязных фильтров  $n = 5$ ;
- коэффициент связи между контурами  $\beta = 1$ ;
- расстройка частоты  $\Delta f = \pm 10 \text{ Мгц}$ .

Находим обобщённую расстройку контуров по формуле

$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta f}{d_3 \cdot f}, \quad (3.5)$$

где  $d_3$  – результирующее затухание контуров.

Принимаем  $d_3 = 0,045$ , при котором выполняется условие

$$\Delta f_{0,707} = \Delta f_{\text{РСП-6М2}} = 1,4 \text{ МГц}. \quad (3.6)$$

Находим коэффициент усиления одного каскада [21] по формуле

$$K_{\text{пр}_{\text{PCP6}}} = \frac{\beta}{d_3 \cdot \sqrt{(1 + \beta^2 - \xi^2)^2 + 4 \cdot \xi^2}}. \quad (3.7)$$

Находим общий коэффициент усиления по формуле

$$K_{\text{PCP6}} = (K_{\text{пр}_{\text{PCP6}}})^n. \quad (3.8)$$

где  $n = 5$  – число каскадов фильтра.

Используя математическую среду Mathcad, была построена характеристика частотной избирательности УПЧ станции РСП-10МН, представленная на рисунке 3.2.

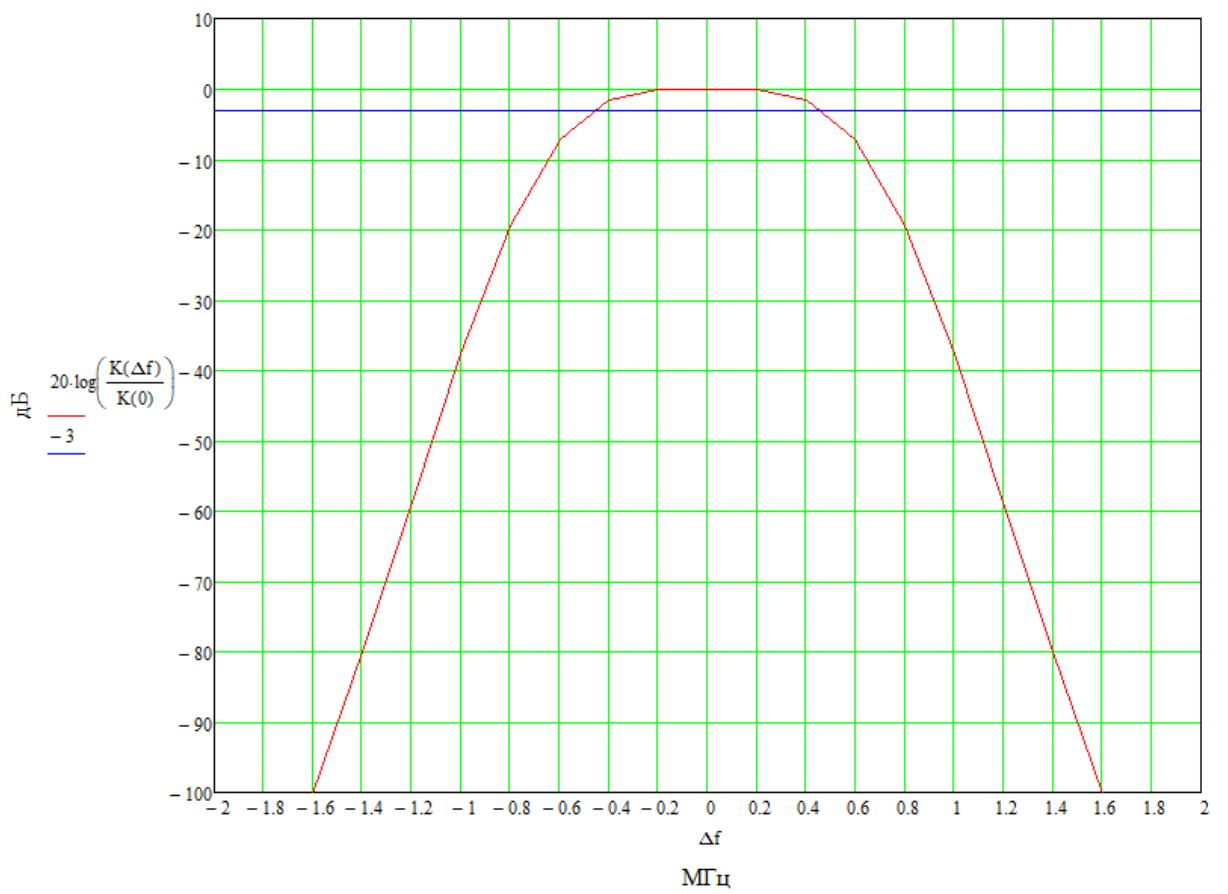


Рисунок 3.2 – Характеристика избирательности РСП-6М2

**4. Определение характеристик частотно-зависимого подавления помех от сети 4G приёмных трактов РСП-10МН и РСП-6М2 в математической среде Matchcad;**

#### **4.1.Характеристика частотно-зависимого подавления помех от 4G в приёмном тракте РСП-10МН**

Используя математическую среду Mathcad и подставив в неё алгоритм расчёта частотно- зависимого подавления с раздела 1.1 и полученные результаты расчёта из разделов 2 и 3, были получены графики зависимости частотно- зависимого подавления радиоприемного тракта станции РСП-10МН. Для примера на рисунке представлено частотно зависимое подавление для РСП-10МН при воздействии сигнала LTE с шириной полосы 20МГц

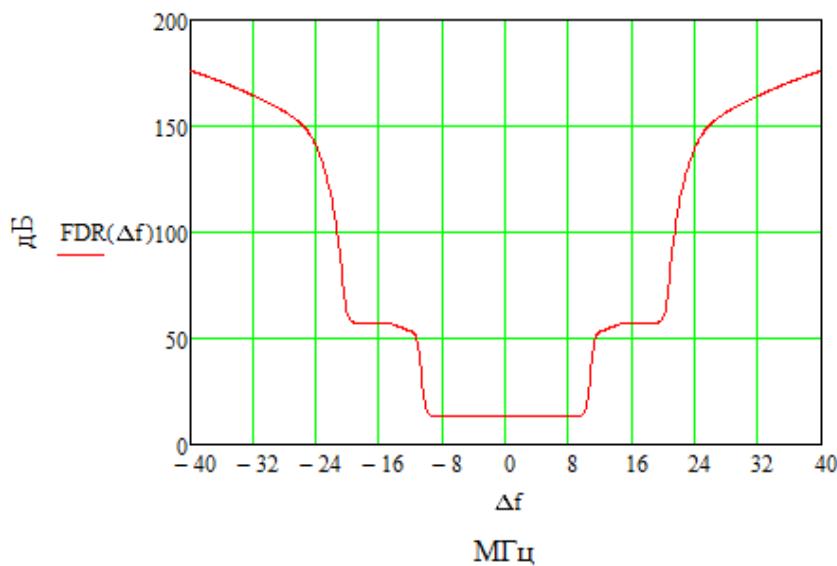
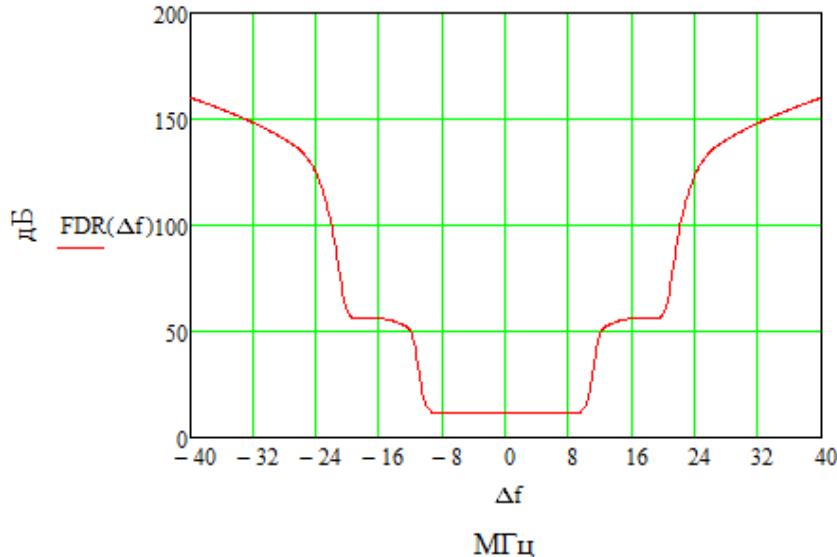


Рисунок 4.1 – Характеристика частотно- зависимого подавления радиоприемного тракта станции РСП-10МН от сети связи 4G с шириной канала 20 МГц

#### **4.2.Характеристика частотно- зависимого подавления помех от 4G в приемном тракте РСП-6М2**

Используя математическую среду Mathcad и подставив в неё алгоритм расчёта частотно- зависимого подавления с раздела 1.1 и полученные результаты расчёта из разделов 2 и 3, были получены графики зависимости частотно- зависимого подавления радиоприемного тракта станции РСП-6М2. Для примера на рисунке представлено частотно зависимое подавление для РСП-6М2 при воздействии сигнала LTE с шириной полосы 20МГц



### 4.3. Определение критериев допустимого помехового воздействия РСП-10МН и РСП-6М2 от сети 4G

В качестве критерия воздействия непреднамеренной помехи на приёмный тракт РСП (восприимчивости к помеховому сигналу) целесообразно использовать коэффициент сжатия (отношение дальности действия в условиях непреднамеренных помех к дальности действия в условиях беспомехового функционирования) [23]. Максимальная дальность действия РСП может быть оценена следующим образом:

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{tx} G^2 S \lambda^2}{(4\pi)^3 q P_n}}, \quad (5.1)$$

где  $D_{\max}$  – максимальная дальность действия РСП, м;  
 $P_{tx}$  – мощность передатчика РСП, подводимая к антенне, Вт;  
 $G$  – коэффициент усиления антенны РСП, раз;  
 $S$  – эффективная площадь отражающей поверхности, м<sup>2</sup>;  
 $\lambda$  – рабочая длина волны РСП, м;  
 $q$  – минимальное отношение (по мощности) сигнал/шум на входе приемного устройства РСП, обеспечивающее необходимое качество функционирования, раз;

$P_n$  – мощность шума наблюдения, приведенная ко входу приемного устройства, Вт.

Принимая параметры  $P_{tx}$ ,  $G$ ,  $S$ ,  $\lambda$ ,  $q$  постоянными или, по крайней мере, не зависящими от помеховой обстановки, имеем:

$$K = \frac{D_{\max \text{ int}}}{D_{\max 0}} = \sqrt[4]{\frac{P_{n 0}}{P_{n \text{ int}}}}, \quad (5.2)$$

где  $K$  – коэффициент сжатия;

$D_{\max \text{ int}}$  – дальность в условиях действия помехи, м;

$D_{\max \text{ int}}$  – дальность в условиях беспомехового функционирования, м;

$P_{n 0}$  – мощность шума наблюдения, приведенная ко входу приёмного устройства в условиях беспомехового функционирования, Вт;

$P_{n \text{ int}}$  – мощность шума наблюдения, приведенная ко входу приёмного устройства в условиях действия помехи, Вт.

Таким образом, в качестве инструментального критерия помехового воздействия на приёмный тракт РСП может быть принято увеличение уровня шума, приведенного ко входу приёмного устройства в условиях действия помехи.

При воздействии непреднамеренной помехи коэффициент сжатия должен превосходить значение 0,94 (в соответствии с рекомендациями МСЭ).

С учетом выше изложенного, получаем:

$$0,94 \leq K = \frac{D_{\max \text{ int}}}{D_{\max 0}} = \sqrt[4]{\frac{P_{n 0}}{P_{n \text{ int}}}}, \quad (5.3)$$

что соответствует  $\frac{P_{n 0}}{P_{n \text{ int}}} \geq 0,79$  (-1 дБ),

что соответствует уровню внешней помехи равному -6 дБ относительно мощности собственного шума приёмного тракта.

## 5. Определение характеристик восприимчивости приёмных трактов РСП от воздействия помех от сети 4G;

Используя данные из предыдущих разделов и математическую среду Matchcad, были получены характеристики восприимчивости приёмного тракта различных РСП-от воздействия помех от сети 4G с различной шириной полосы канала. Для примера, на рисунке представлена характеристика восприимчивости РСП-10МН для сигнала LTE с полосой 1,4МГц.



Рисунок 6.5 – Характеристика восприимчивости приёмного тракта станции РСП-10МН от сети связи 4G с шириной канала 1,4 МГц

Уровень помехи от сети 4G на полосе частот  $\Delta f$  составляет  $P_{\text{пом}1,4} = -107,28 \text{ дБм}$ , что удовлетворяет условию

$$P_{\text{пом}} \leq \Delta P + FDR_{\text{PCP10MN}_{1,4}}(\Delta f) = -103 + 2,6 = -101,4 \text{ дБм}. \quad (6.5)$$

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

При выполнении диссертационной работы были получены результаты математического моделирования восприимчивости приёмных трактов станций РСП от сетей связи 4G. Произведен расчёт избирательности приёмных трактов станций РСП, расчёт спектральной плотности сигнала 4G при различной ширине частот канала, получены характеристики восприимчивости приёмных трактов станций РСП. Расчёты были произведены путем математического моделирования в среде Mathcad.

В диссертационной работе получены характеристики восприимчивости приёмных трактов станций РСП от сетей связи 4G, выполнен поиск научно-технической литературы и проведен анализ приёмных трактов РСП-10МН и РСП-6М2 и физического уровня LTE, выбрана методика расчёта восприимчивости приёмных трактов станции РСП. Рассчитаны спектральные характеристики сигнала 4G, рассчитаны характеристики линейной избирательности приёмных трактов станций РСП-10МН и РСП-6М2; рассчитаны характеристики частотно-зависимого подавления помех от сети 4G приёмных трактов РСП-10МН и РСП-6М2; рассчитаны критерии допустимого помехового воздействия на РСП-10МН и РСП-6М2 от сети 4G; рассчитаны характеристики восприимчивости приёмных трактов РСП-10МН и РСП-6М2 от воздействия помех от сети 4G.

Практическая значимость разработанной методики заключается в применении для оптимизации работы РСП с учётом внешнего воздействия сети связи 4G и улучшения качества связи.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Стандарт предприятия БГУИР СТП01–2024. / А.Т. Доманов, Н.И. Сорока. – 170с.
- [2] ГОСТ 2.605-68. Единая система конструкторской документации. Плакаты учебно-технические. Общие технические требования. – Введ. – М. :Изд-во стандартов – 169 с.
- [3] ГОСТ 2.731-68. Обозначения условные графические в схемах. Приборы электровакуумные. – Введ. – М. :Изд-во стандартов – 44 с.
- [4] ГОСТ 2.701–2008. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – Введ. – М. :Изд-во стандартов – 16 с.
- [5] Радиолокационная система посадки РСП-6М2. / С.И. Волков, А.А. Каргапольцев, Н.Н. Курилов. – Москва, 2010 – 156 с.
- [6] Методические рекомендации по военно-специальной подготовке по ВУС–121100. Основы функционирования и эксплуатации средств радиотехнического обеспечения полетов авиации. Часть 3. / Богданов В.П. – Таганрог, 2007. – 110 с.
- [7] Радиолокационная система посадки самолётов РСП-10МН. Техническое описание ЕИ.001.013 ТОЗ. Книга 3 – 1976.
- [8] РСП-6М2. Техническое описание ВШ1.000.006 ТО. – 1980.
- [9] Е-533 Альбом № 6. Схемы, таблицы и карты. вШ1.000.006 ОП5.
- [10] Что такое 4G LTE и как он работает? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ys-system.ru/news/chto-takoe-4g-lte-i-kak-on-rabotaet/>. – Дата доступа: 17.05 2025.
- [11] Уровни стека протокола LTE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://post.nghiatu.com/ru/tutorial/lte/lte-protocol-stack-layers/urovni-steka-protokola-lte>. – Дата доступа: 17.05 2025.
- [12] Технология LTE мобильной передачи данных. / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. – Санкт-Петербург,2011. – 206 с.
- [13] 4G. LTE - Long Term Evolution. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://celnet.ru/4G.php>. – Дата доступа: 17.05 2025.
- [14] Физический уровень LTE. / Ф. Райал. // Электронные компоненты. – 2010. – № 10 – С. 38–40.
- [15] Рекомендация МСЭ-R M.2070-2. Характеристики нежелательных излучений базовых станций, использующих наземные радиоинтерфейсы IMT-Advanced. – ITU, 2025. – 165 с.
- [16] 3GPP Technical Specification 36.104 V18.6.0. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 18). – 2024. – 297 с.
- [17] 3GPP Technical Specification 36.101 V19.1.0. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (EU) radio transmission and reception (Release 19). – 2025. – 2037 с.

- [18] Радиолокационная система посадки самолётов РСП-10МН. Техническое описание ЕИ.001.013 ТО1. Книга 1. – 1976.
- [19] Радиоприемные устройства. / В. И. Сифоров. – 1974. – 563 с.
- [20] РСП-6М2. Техническое описание ВШ1.000.006 ТО. – 1980.
- [21] Проведение экспертизы на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств подвижной электросвязи технологии IMT в полосах частот 1935-1945/2125-2135 МГц СООО «Белорусские облачные технологии» с РЭС гражданского назначения и специального назначения Министерства обороны. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/6404>. – Дата доступа: 17.05 2025.
- [22] Рекомендация МСЭ-R SM.337-6. Частотный и территориальный разнос. – ITU, 2008. – 12 с.
- [23] *Recommendation ITU-R P.341-7. The concept of transmission loss for radio links.* – ITU, 2019 – 9 с.