

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «Основы электромагнитной совместимости»
для студентов направления подготовки
11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
Направленность (профиль)
«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

Ставрополь 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Лабораторная работа №1. Исследование эффектов блокирования радиоэлектронных устройств
2. Лабораторная работа №2. Исследование перекрестных искажений в радиоэлектронных устройствах
3. Лабораторная работа №3. Исследование ослабления помех фильтрами ВЧ сигналов в задачах электромагнитной совместимости
4. Лабораторная работа №4. Исследование ослабления помех развязывающими фильтрами в задачах электромагнитной совместимости
5. Лабораторная работа №5. Исследование подавления внеполосных помеховых излучений РЭС
6. Лабораторная работа №6. Исследование побочных излучений радиоэлектронных средств
7. Лабораторная работа №7. Исследование ширины полосы частот и внеполосных излучений
8. Лабораторная работа №8. Исследование отклонения частоты радиопередатчика
9. Лабораторная работа №9. Исследование частотно-территориального планирования

ВВЕДЕНИЕ

1. Цели и задачи освоения дисциплины:

Выполнения лабораторных работ по дисциплине «Основы электромагнитной совместимости» обеспечивают формирование у обучающихся набора профессиональных компетенций (ПК-1, ПК-2, ПК-5), которые обеспечивают их профессиональную деятельность в области основ электромагнитной совместимости:

1. Способность иметь навыки самостоятельной работы на компьютере и в компьютерных сетях; осуществлять компьютерное моделирование электромагнитной совместимости, систем и процессов с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.

2. Способность использовать нормативную и правовую документацию, характерную для области инфокоммуникационных технологий и систем связи.

3. Способностью осуществлять исследования электромагнитной совместимости в различных радиотехнических системах.

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-1. Способен к развитию коммутационных подсистем и сетевых платформ, сетей передачи данных, транспортных сетей и сетей радиодоступа, спутниковых систем связи	ИД-1 _{ПК-1} понимает и ориентируется в принципах построения и работы сетей связи, в том числе их составляющих подсистем, и протоколов сигнализации, стандартах качества передачи данных, голоса и видео, применяемых в сетях связи, в Законодательстве Российской Федерации в области связи.	Ориентируется в принципах построения и работы радиосетей связи, в том числе их составляющих подсистем, с точки зрения электромагнитной совместимости, Законодательстве Российской Федерации в области электромагнитной совместимости.
	ИД-3 _{ПК-1} . анализирует статистику основных показателей эффективности радиосистем и систем передачи данных, разрабатывает мероприятия по их поддержанию на требуемом уровне, выполняет расчет пропускной способности сетей телекоммуникаций.	Анализирует статистику основных показателей электромагнитной совместимости радиосистем и систем передачи данных.
ПК-2.	ИД-1 _{ПК-2} понимает основы электротехники, сетевых технологий, принципы работы, показатели использования и функционирования телекоммуникационного оборудования, требования технических регламентов, международных и национальных стандартов и иных нормативных документов в области оценки качественных показателей работы инфокоммуникационного оборудования.	Понимает основы электромагнитной совместимости телекоммуникационного оборудования, требования технических регламентов, стандартов в области оценки качественных показателей работы инфокоммуникационного оборудования.
	ИД-2 _{ПК-2} соблюдает требования программ и методик по проведению экспериментальных испытаний объектов и систем связи (инфокоммуникационного оборудования).	Соблюдает требования программ и методик по проведению экспериментальных испытаний объектов и систем связи по электромагнитной совместимости.
	ИД-3 _{ПК-2} работает с программным обеспечением, используемым при обработке информации инфокоммуникационных систем и их составляющих, техническими средствами сбора и обработки данных, с различными информационными системами и базами данных.	Работает с программным обеспечением, используемым при обработке информации инфокоммуникационных систем и их составляющих, техническими средствами сбора и обработки

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
		данных по электромагнитной совместимости.
	ИД-4 _{ПК-2} контролирует качественные показатели работы инфокоммуникационного оборудования в соответствии с их нормативными показателями.	Контролирует качественные показатели работы инфокоммуникационного оборудования по электромагнитной совместимости в соответствии с их нормативными показателями.
	ИД-5 _{ПК-2} проводить экспериментальные исследования по имеющимся программам и методикам испытаний объектов и систем связи (инфокоммуникационного оборудования) с целью оценки их качественных показателей работы.	Проводить экспериментальные исследования по имеющимся методикам испытаний систем радиосвязи с целью оценки их показателей работы по электромагнитной совместимости.
ПК-5. Способность осуществлять монтаж, настройку, регулировку тестирование оборудования, отработку режимов работы, контроль проектных параметров работы и испытания оборудования связи, обеспечение соответствия технических параметров инфокоммуникационных систем и /или их составляющих, установленным эксплуатационно-техническим нормам	ИД-1 _{ПК-5} понимает действующие отраслевые нормативы, определяющие требования к параметрам работы оборудования, каналов и трактов; методики проведения проверки технического состояния оборудования, трактов и каналов передачи.	Понимает действующие отраслевые нормативы, определяющие требования к параметрам работы оборудования по электромагнитной совместимости; методики проведения проверки технического состояния оборудования по электромагнитной совместимости.
	ИД-4 _{ПК-5} проводит входной контроль оборудования, подготовку испытательного оборудования, измерительной аппаратуры, приспособлений; тестирование оборудования и отработку режимов работы оборудования.	Проводит входной контроль оборудования, подготовку испытательного оборудования, измерительной аппаратуры, приспособлений; тестирование оборудования и отработку режимов работы оборудования.

Задания предназначены для подготовки и выполнения лабораторных работ по дисциплине «Основы электромагнитной совместимости» и содержат контрольные вопросы для проверки и самопроверки.

Ознакомление с заданием на лабораторную работу и методикой ее выполнения, подготовка отчетов, вычерчивание схем, таблиц, графиков, аналитические расчеты осуществляются в часы самостоятельной работы. Накануне занятий обучающиеся в составе учебной группы прибывают в лабораторию, изучают меры безопасности при выполнении работы, порядок выполнения работы, знакомятся с рабочим местом ПЭВМ, лабораторной станцией NI ELVIS модулями расширения Emona DATEx, измерительными приборами (рис.1).

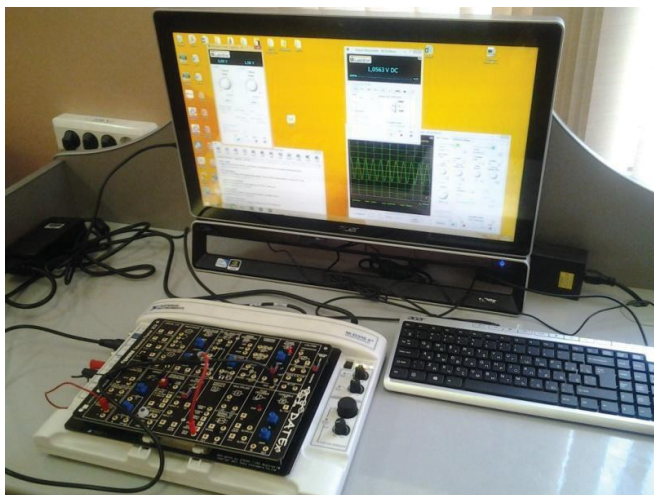


Рис.1. Лабораторная станция NI ELVIS

Подготовка лабораторной базы проводится заведующим (инженером) лаборатории под руководством преподавателя.

Меры безопасности

К выполнению работ допускаются лица, изучившие необходимый теоретический материал, знакомые с содержанием и методикой выполнения лабораторной работы и прошедшие инструктаж по мерам безопасности и особенностям выполнения работы под роспись.

В ходе работы необходимо соблюдать следующие правила:

1. Изучать состав и размещение элементов лабораторной установки при выключенном питании.
2. Включать питание аппаратуры только с разрешения преподавателя или сотрудника лаборатории.

3. Строго соблюдать порядок подготовки к включению, включения и выключения ПЭВМ, лабораторной станции *NI ELVIS*, лабораторных установок и контрольно-измерительной аппаратуры.
4. После включения питания выполнять общие правила по мерам безопасности при работе с аппаратурой, в которой имеются источники электрического напряжения более 30 В.
5. Не оставлять аппаратуру включенной без наблюдения.
6. При внезапном выключении электропитания немедленно выключить ПЭВМ, лабораторные установки и контрольно-измерительную аппаратуру.

Категорически запрещается:

1. Касаться руками оголенных проводов и частей приборов после подачи напряжения на рабочем месте.
2. Производить изменения в схеме при подключенных источниках питания.
3. Выполнять работы, не предусмотренные заданием.

При выполнении работы с ПЭВМ:

Обучающиеся под руководством преподавателя в лаборатории выполняют следующие мероприятия:

1. Изучают особенности рабочего места с ПЭВМ, программами схемотехнического моделирования:
2. Представляют для проверки преподавателю подготовленный в часы самоподготовки отчет о лабораторной работе.
3. Подтверждают готовность к занятию. Проверка готовности проводится путем устного или письменного опроса по контрольным вопросам.
4. По команде преподавателя приступают к выполнению задания на лабораторную работу.
5. Выполняют работу строго по пунктам.
6. Обучающиеся, успешно выполнившие задания и оформившие отчет, прибывают к преподавателю для защиты отчета.
7. За 15 мин до окончания занятия измерения заканчиваются, заполняется документация.
8. За 5 мин до окончания занятия каждое рабочее место предъявляется для проверки его исправности и комплектности сотруднику лаборатории.

Лабораторная работа № 1.

Исследование эффектов блокирования радиоэлектронных устройств

Цель работы: исследование эффекта блокирования радиоприемного устройства радиопомехой в задачах обеспечения электромагнитной совместимости РЭС.

Краткие сведения из теории

Под электромагнитной совместимостью радиоэлектронных средств понимают способность радиоэлектронных средств (РЭС) одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех и не создавать радиопомех другим электронным средствам. К радиопомехам (электромагнитным помехам) относятся любые электромагнитные возмущения в цепях РЭС и окружающем пространстве, вызывающие нежелательную реакцию оборудования, сказывающуюся в снижении эксплуатационно-технических характеристик систем и устройств. Свойство радиоприемника реагировать на электромагнитные помехи, воздействующие через антенну или помимо ее, в том числе через корпус, экран, по цепям питания (рис.1), характеризуются восприимчивостью.



ВЧ кабель антенны

Рис.1. Приемник автоматического радиокompаса на борту ВС

Реакция приемника на воздействие помех может проявиться в возникновении эффекта блокирования.

Блокирование в приемниках радиоэлектронных устройств - это изменение уровня сигнала или отношения сигнал/шум на выходе при действии немодулированной радиопомехи, частота которой не совпадает с частотами основного и побочных каналов приема. При этом уменьшается усиление приемника. Блокирование обусловлено

нелинейными свойствами электрических цепей передачи полезного сигнала и воздействующей помехи: смесителей, усилителей. Это проявляется в каскадах, имеющих участки насыщения амплитудных характеристик (рис.2).

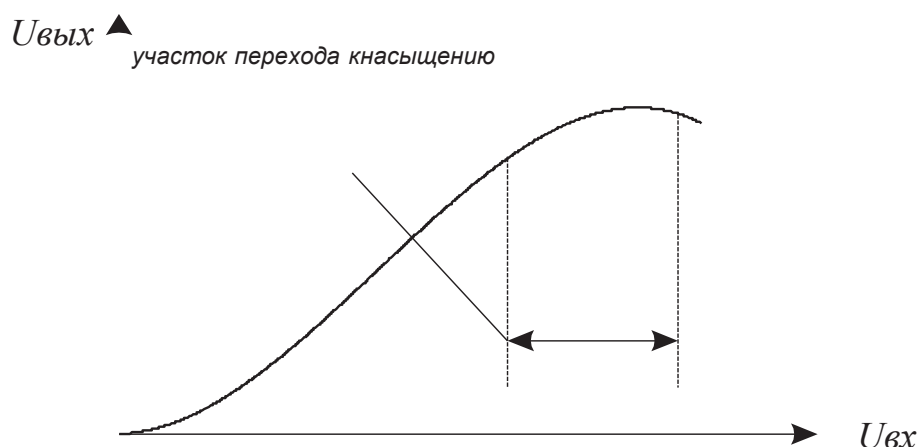


Рис.2. Типовая амплитудная характеристика

Математические зависимости амплитудных характеристик имеют составляющие с кубическими полиномами:

$$U_{\text{ВЫХ}} \approx a_1 U_{\text{ВХ}} + a_2 U_{\text{ВХ}}^2 + a_3 U_{\text{ВХ}}^3 + \dots,$$

где $a_3 < 0$.

За счет нелинейных преобразований в смешенном электромагнитном процессе появляются составляющие, имеющие функциональную зависимость от уровня помехи с отрицательным значением (из-за $a_3 < 0$). Это приводит к тому, что при увеличении уровня помехи результирующий информационный процесс будет подавляться.

Эффект блокирования проявляется тем сильнее, чем больше уровень помехи и чем ближе ее частота к основному каналу приемника. Количественной характеристикой блокирования служит коэффициент блокирования, численно равный отношению изменения амплитуды сигнала на выходе приемника под действием помехи к амплитуде сигнала при отсутствии помехи:

$$K_{\text{бл}} = \frac{|U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ВЫХ.бл.}}|}{U_{\text{ВЫХ}}}, \quad (1)$$

где $U_{вых}$ - амплитуда сигнала на выходе приемника при отсутствии и

$U_{вых.бл}$ - амплитуда сигнала на выходе приемника при наличии помехи.

При отсутствии блокирования $K_{бл} = 0$, при полном блокировании $K_{бл} = 1$. Значение коэффициента блокирования, соответствующие допустимому изменению уровня сигнала на выходе приемника, лежат в пределах 0.3.. 0.5. Свойство приёмника принимать полезный сигнал в присутствии сильной помехи до порога блокирования характеризуется динамическим диапазоном по блокированию в дБ:

$$D_{бл} = 20 \lg \frac{U_{(П, доп) бл.}}{U_{с. мин}}, \quad (2)$$

где $U_{с. мин.}$ - минимальное напряжение полезного сигнала, соответствующее чувствительности приёмника, $U_{П доп. бл}$ - «порог блокирования» - максимально допустимое напряжение помехи, вызывающее блокирование.

На некоторые типы приемников государственными стандартами установлен динамический диапазон по блокированию 60...80 дБ. Сильная помеха приводит к ухудшению избирательных свойств приемника - расширению полосы пропускания и ухудшению коэффициента прямоугольности частотной характеристики.

Программа работы

Исследование эффекта блокирования

В данном задании исследуется процесс проявления эффекта блокирования в радиоприемном устройстве, возникающем при действии радиопомехи, частота которой не совпадает с частотой приема.

Для выполнения исследований необходимо собрать схему установки, согласно рис.3.

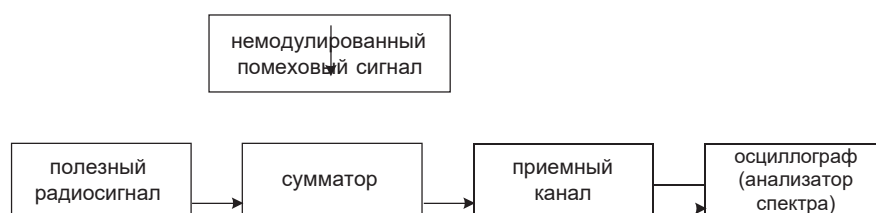


Рис.3. Структурная схема установки

Сборка схемы выполняется при помощи функциональных блоков на панели тренажера DATEx лабораторной станции NI ELVIS (рис.4).

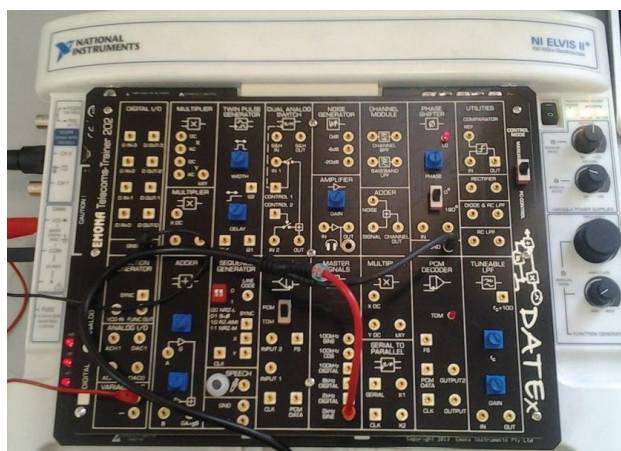


Рис.4. Функциональные блоки на панели тренажера DATEx

Подключите NI ELVIS к модулю ввода-вывода NI DAQ и к персональному компьютеру.

Включите питание NI ELVIS с помощью выключателя, расположенного на задней стенке устройства, затем включите питание макетной платы, выключатель расположен на передней стенке устройства.

Включите компьютер и дайте ему загрузиться.

Когда загрузка завершится, включите модуль ввода-вывода DAQ и дождитесь визуального или звукового сигнала о том, что компьютер обнаружил модуль NI DAQ.

Запустите программу NI ELVIS.

Запустите программу управления DATEx (DATEx soft front-panel - SFP).

Установите виртуальный элемент управления Voltage (Напряжение) регулируемого источника отрицательного напряжения питания в среднее положение.

С помощью элемента управления g модуля Adder (Сумматор) установите напряжение на выходе сумматора равным 1V постоянного тока (DC) (рис.5).

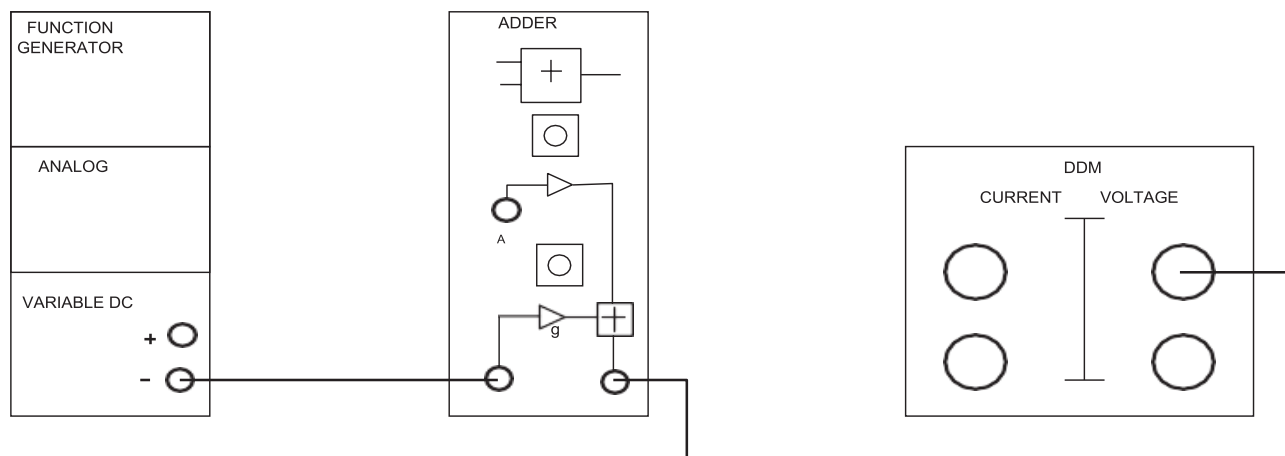


Рис.5.

Соберите схему устройства, формирующего полезный АМ радиосигнал нарис. 6.

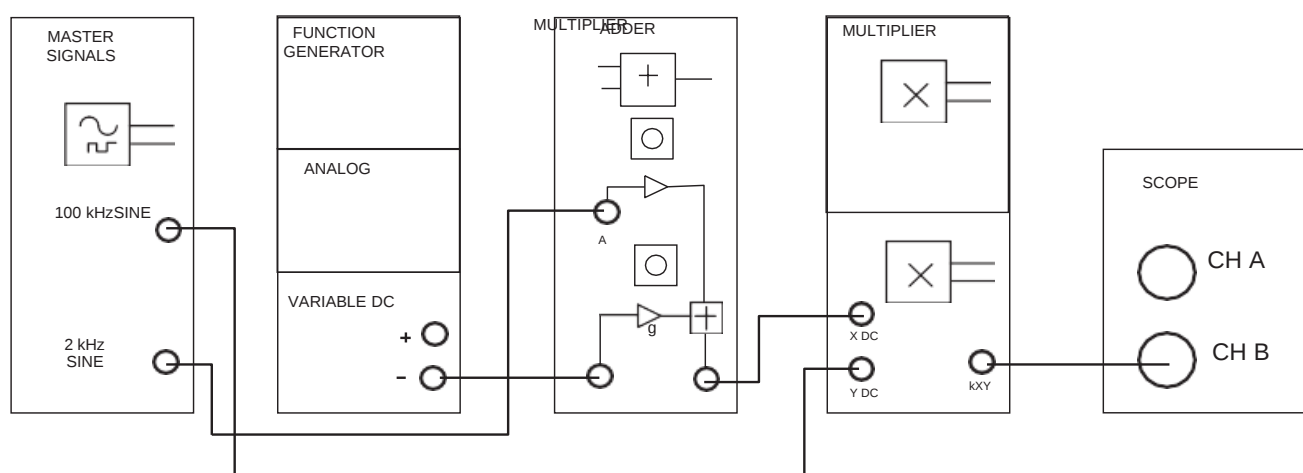


Рис.6.

Эта схема генерирует несущую, которая модулируется по амплитуде сигналом сообщения в виде синусоиды 2 кГц.

Запустите программу (VI) *Oscilloscope NI ELVIS* (Осциллограф).

Отрегулируйте виртуальный элемент управления g модуля Adder (Сумматор) так, чтобы получить синусоиду с пиковой амплитудой 1 В. Зарисуйте сформированный АМ радиосигнал.

Измените схему, как показано на рис. 7.

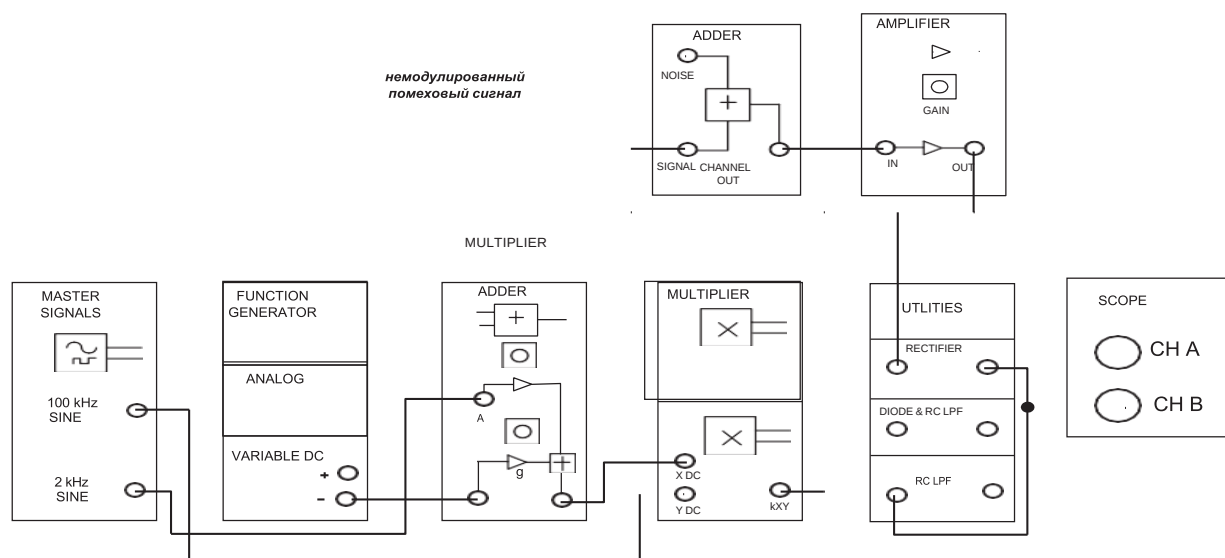


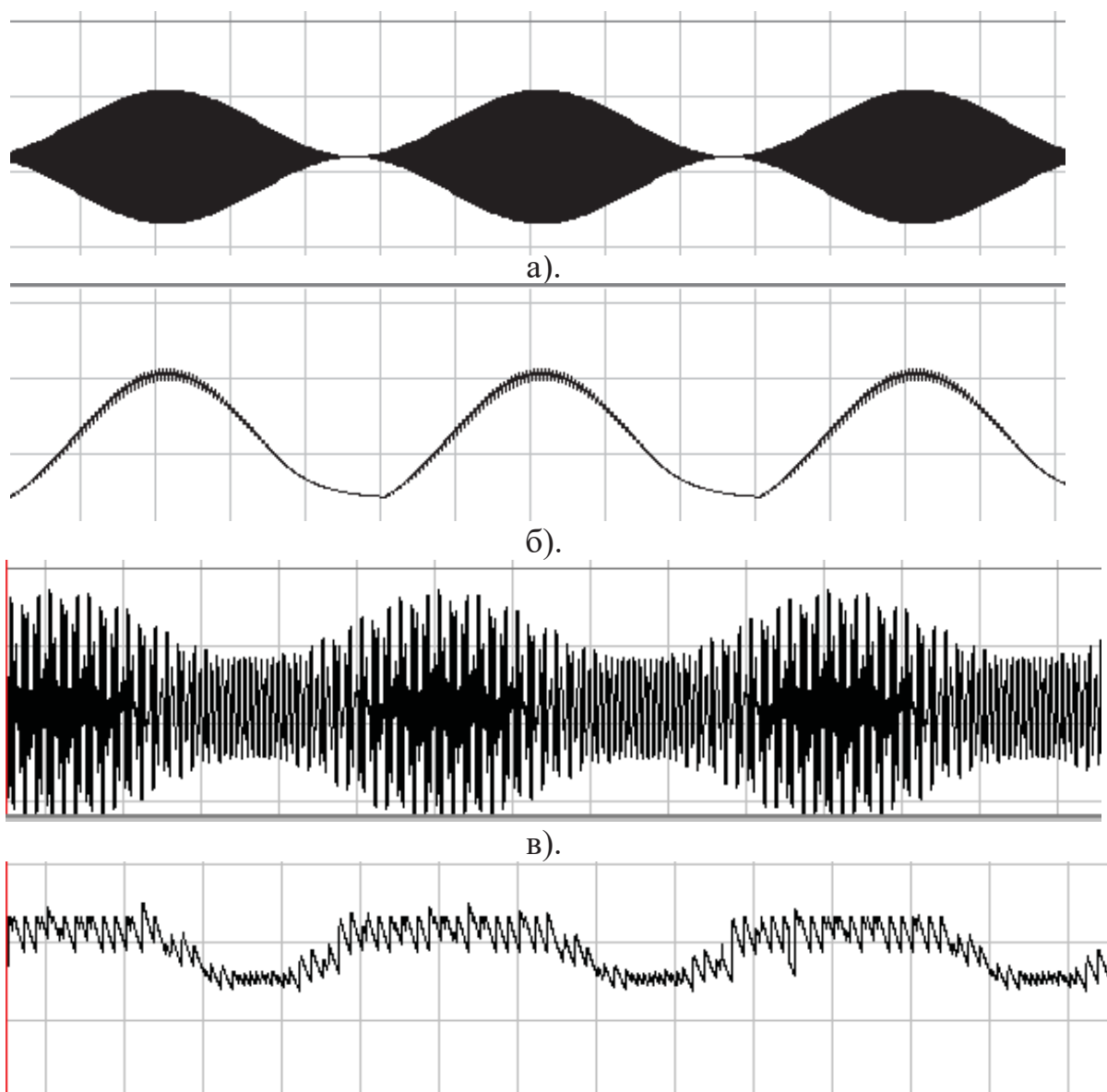
Рис.7.

Зарисуйте принимаемый АМ радиосигнал с выхода усилителя (рис.8а). На второй вход добавленного сумматора (ADDER) подайте *помеховый сигнал* с блока FUNCTION GENERATOR. Частота помехи должна отличаться от частоты сигнала, но находится внутри полосы пропускания приемника.

Увеличивая входное напряжение помехи, следите за изменением суммарного (сигнал + помеха) напряжения на выходе усилителя (AMPLIFIER) и фильтра RC LPF радиоприемного устройства и проявлением эффекта блокирования.

При незначительных напряжениях $U_{П.вх}$ выходной низкочастотный сигнал $U_{вых.бл}$ изменяется слабо и не имеет искажений (рис.8б). При дальнейшем увеличении $U_{П.вх}$, радиосигнал с выхода усилителя искажается (рис.8в), а сигнал с выхода детектора начинает уменьшаться по амплитуде (рис.8г). В этом проявляется эффект блокирования. Зарисуйте эюры формируемых сигналов. Эти эюры дают представление о характере сигналов проходящих через тракт радиоприемного устройства.

Оцените динамический диапазон по блокированию по формуле (2).



г).Рис.8

Рассчитайте коэффициент блокирования по формуле (1). Полученные значения $K_{\text{бл}}$ занесите в табл.1.

Таблица 1

	$U_{\text{вых. бл}}$	$U_{\text{П вх}}$	$K_{\text{бл}}$	$U_{\text{В}} / U_{\text{П}}$

Постройте графики амплитудной зависимости характеристики блокирования

радиоприемного устройства в виде зависимости $U_{вых.бл} = f(U_{П\ вх})$, зависимость $K_{бл} = f(U_{П\ вх})$ (рис.9).

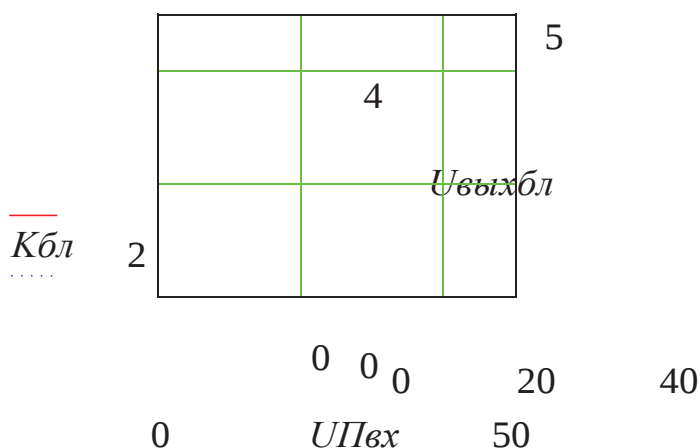


Рис.9. Характеристики блокирования

Оценка эффективности избирательности РПУ по блокированию. Оставляя частоту и амплитуду входного сигнала постоянной и равной, измените частоту помехи в пределах полосы пропускания радиоприемного устройства. Данные измерений запишите в табл. 2.

Таблица 2

№	$F_{П\ вх}$	$U_{вых.бл}$
1		
2		
3		
4		
5		

По данным табл.2. постройте графическую зависимость $U_{вых.бл} = f(F_{П\ вх})$ (рис. 9). По результатам лабораторной работы необходимо составить индивидуальный отчет, содержащий иллюстративный материал зависимостей:

$$U_{вых.бл} = f(U_{П\ вх}), K_{бл} = f(U_{П\ вх}), U_{вых.бл} = f(F_{П\ вх}).$$

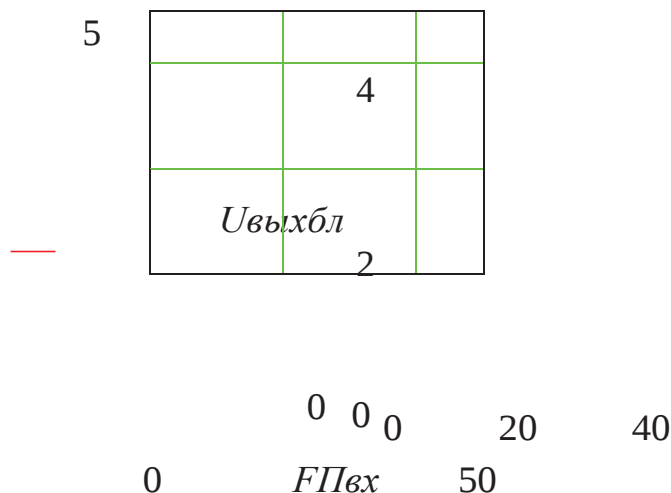


Рис.10. График зависимости амплитуды выходного сигнала от частоты помехи

Отчет должен содержать:

1. Функциональную схему установки для исследования эффекта блокирования радиоприемного устройства.
2. Результаты оценки динамического диапазона радиоприемного устройства по блокированию.
3. Расчет коэффициента блокирования.
4. Графики Характеристики блокирования.
5. Графики зависимости амплитуды выходного сигнала от частоты помехи.
6. Заполненные таблицы результатов исследований.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение электромагнитной совместимости РЭС.
2. Что такое восприимчивость приемника?
3. Поясните эффект блокирования радиоприемного устройства помехой.
4. Как определяется коэффициент блокирования?
5. В каких пределах лежат коэффициенты блокирования, соответствующие допустимому изменению уровня сигнала на выходе приемника?

Литература

- С.Б. Стукалов. Электромагнитная совместимость. Пособие по изучению дисциплины и контрольные задания М. МГТУ ГА. 2017. 32 с.
- Ю.Е. Седельников. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных

средств. Учебное пособие. Казань. Новое знание. 2006. 304 с.

Лабораторная работа № 2.

Исследование перекрестных искажений в радиоэлектронных устройствах

Цель работы: исследование эффектов перекрестных искажений вызванных модулированной радиопомехой в задачах обеспечения электромагнитной совместимости РЭС.

Краткие сведения из теории

Перекрёстные искажения полезного сигнала – это искажения спектра сигнала на выходе приёмника при действии на входе модулированной помехи, частота которой не совпадает с частотами основного и побочных каналов приёма. Перекрестные искажения проявляются в виде модуляции принятого сигнала частотами модуляции помехи $\Omega_{\text{п}}$. Явление перекрестных искажений имеет такую же природу, как и эффект блокирования, обусловленную нелинейными свойствами электрических цепей (рис.11).

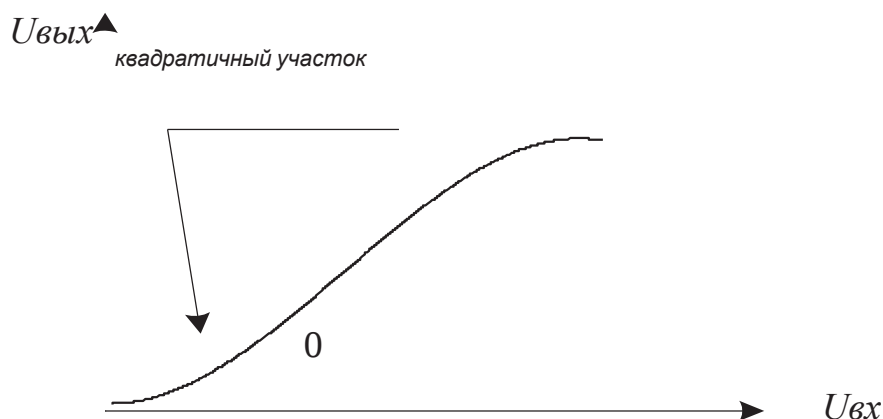


Рис.11. Амплитудная характеристика нелинейной электрической цепи

Квадратичные участки амплитудных характеристик являются причиной формирования комбинационных гармоник, возникающих при воздействии на нелинейные цепи суммы полезного сигнала u_c с несущей частотой ω_c , частотой модуляции и помехового сигнала u_n с несущей частотой ω_c частотой модуляции :

$$\sin u_{\text{вх}} = u_c + u_n = U_c(\Omega_c) \quad \omega_c t + U_n \Omega_n) \quad \omega_n t$$

Математические зависимости амплитудных характеристик имеют составляющие со степенными полиномами:

$$U_{\text{вых}} \approx a_1 U_{\text{вх}} + a_2 U_{\text{вх}}^2 + a_3 U_{\text{вх}}^3 + a_4 U_{\text{вх}}^4 \dots$$

Расчеты степенных полиномов подтверждают возникновение комбинационных гармоник с частотами:

$$|\omega_c \pm \omega_{\text{п}}|, |2\omega_c \pm 2\omega_{\text{п}}|, \text{ и т.п.}$$

Эти гармоники вызывают искажение спектра полезного принимаемого сигнала.

Перекрыстные искажения оцениваются коэффициентом перекрыстных искажений. Параметр определяется отношением уровня спектральных составляющих $U_{\text{вых.ПИ}}$, возникших в результате перекрестных искажений, к уровню сигнала $U_{\text{вых.С}}$ на выходе приёмника при заданных параметрах радиопомехи и сигнала

$$K_{\text{ПИ}} = \frac{U_{\text{вых.ПИ}}}{U_{\text{вых.С}}}. \quad (3)$$

Уровень спектральных составляющих определяется:

$$U_{\text{вых.ПИ}} = \sqrt{U_{\text{П1}}^2 + \dots + U_{\text{ПN}}^2}$$

где $U_{\text{П1}}^2, \dots, U_{\text{ПN}}^2$ - уровни возникших помеховых гармоник (первой и др.).

Способность РПУ принимать сигнал в присутствии сильной помехи с допустимыми перекрестными искажениями определяется динамическим диапазоном по перекрестным искажениям:

$$D_{\text{ПИ}} = 20 \lg \frac{U_{\text{ПИ, доп}}}{U_{\text{с. мин}}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{с. мин.}}$ - минимальное напряжение полезного сигнала, соответствующее чувствительности приёмника, $U_{\text{ПИ доп.}}$ - «порог перекрестных искажений» - максимально допустимое напряжение помехи, вызывающее искажение.

Программа работы

Исследование перекрестных искажений

В данном задании исследуется процесс возникновения перекрестных искажений в радиоприемном устройстве, возникающем при действии радиопомехи, частота которой не совпадает с частотой приема.

Для выполнения исследований необходимо собрать схему установки, согласно рис.12.



Рис.12. Структурная схема установки

Схема установки собирается при помощи функциональных блоков на панели тренажера DATEx лабораторной станции NI ELVIS. Сборка выполняется в два этапа.

Первый этап – сборка приемного устройства АМ радиосигнала. Выполняется согласно задания на лабораторную работу №1. Отличием является подача на сумматор помехового АМ сигнала, частота которой не совпадает с частотами основного и побочных каналов приёма. Формирователь помехового АМ сигнала собирается на втором этапе программы работы.

Второй этап – сборка полной схемы установки и проведение измерений. Схема формирователя помехового АМ сигнала приведена на рис.13. Значение несущей частоты устанавливается параметрами блока FUNCTION GENERATOR.

Рис.13.

Соберите полную схему установки, как показано на рис. 14.

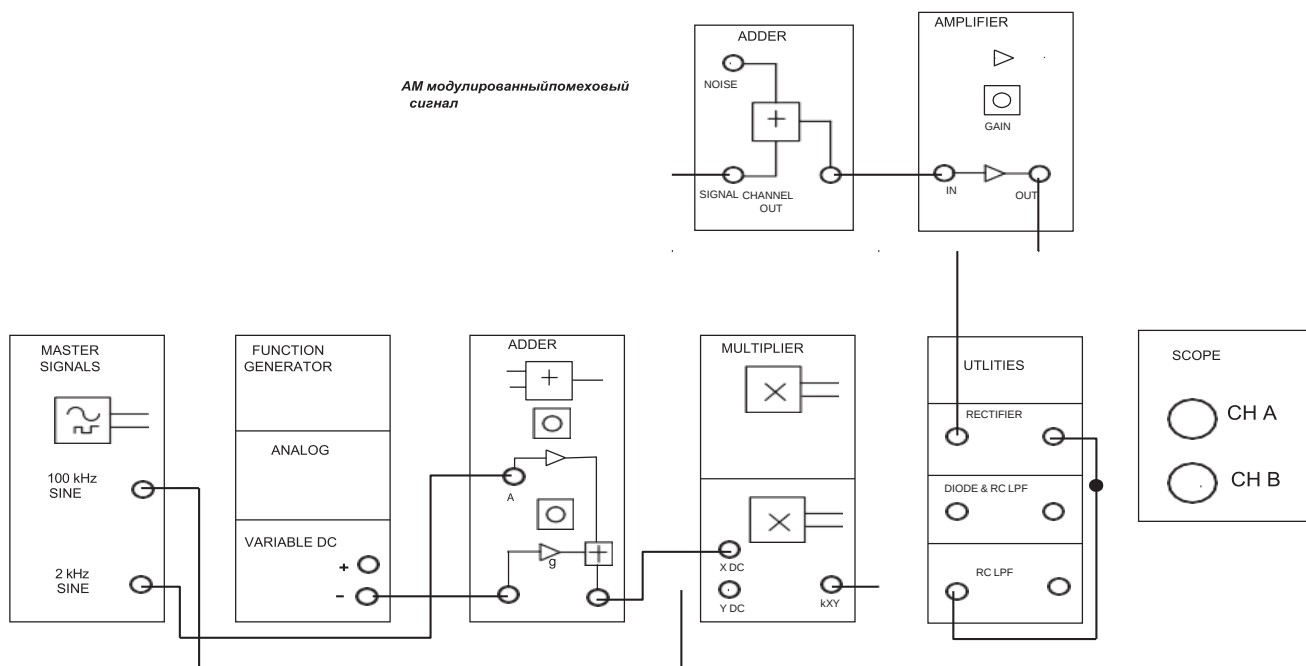


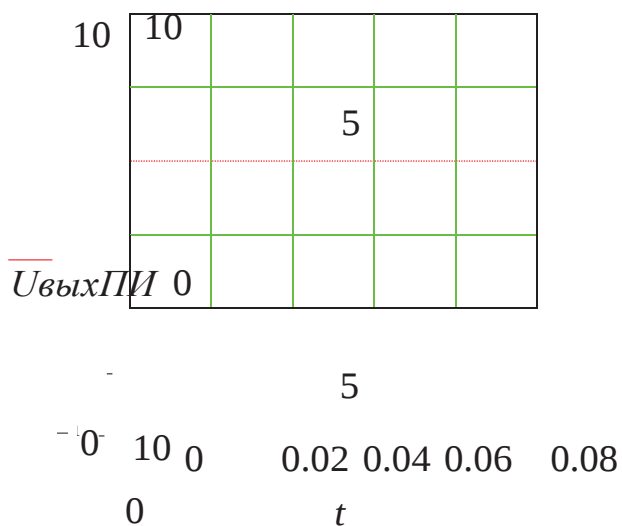
Рис.14.

На второй вход сумматора (ADDER) подайте *помеховый AM сигнал*. Частота помехи должна отличаться от частоты сигнала, но находится внутри полосы пропускания приемника.

Увеличивая входное напряжение помехи, следите за искажением выходного сигнала радиоприемного устройства.

Запустите программу (VI) виртуального измерительного прибора Dynamic Signal Analyzer (Анализатор спектра) NI ELVIS.

Зарисуйте временные (рис. 15) и частотные диаграммы выходных сигналов в (рис.16).



0.1

Рис.15. Временная диаграмма сигнала на выходе приемника
1

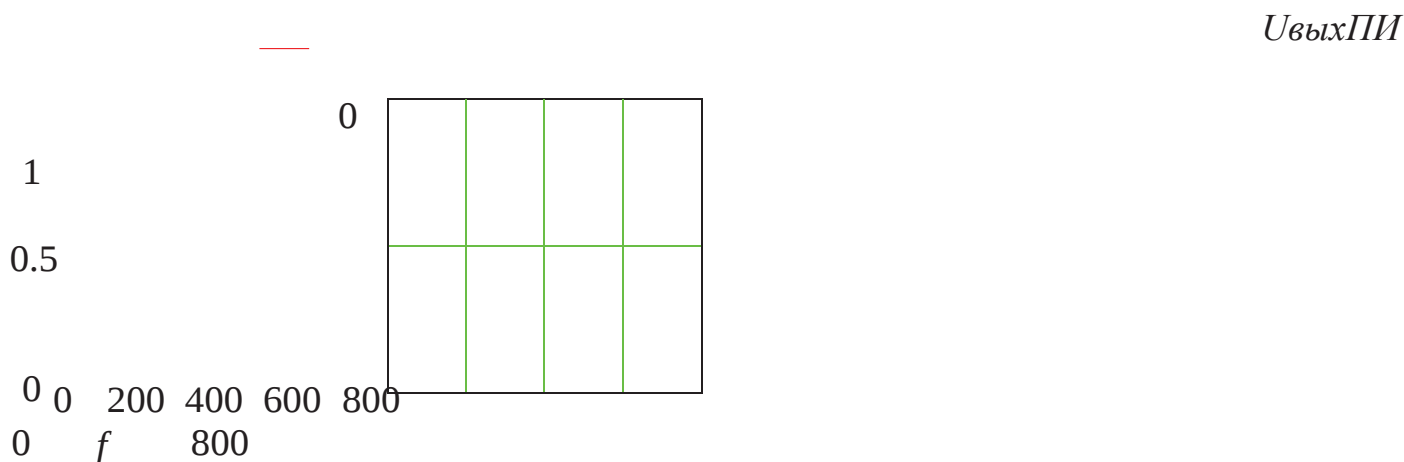


Рис.16. Частотная диаграмма сигнала на выходе приемника

Эти диаграммы дают представление о характере выходных сигналов радиоприемного устройства. При незначительных напряжениях $U_{П.вх}$ выходной сигнал $U_{вых.ПИ}$ изменяется слабо и не имеет искажений, а при дальнейшем увеличении $U_{П.вх}$, сигнал на выходе искажается.

Определите коэффициент перекрёстных искажений по формулам (3), (4) для разных уровней помехового сигнала.

Оцените динамический диапазон по перекрестным искажениям по формуле (5). Полученные значения $K_{ПИ}$ занесите в табл.3.

Таблица 3

№	$U_{вых.ПИ}$	$U_{вых.С}$	$K_{ПИ}$	$U_{Пвх}$
1				
2				
3				
4				
5				

Постройте графики зависимости коэффициента перекрёстных искажений от напряжения помехи $K_{ПИ} = f(U_{П.вх})$ (рис.17).

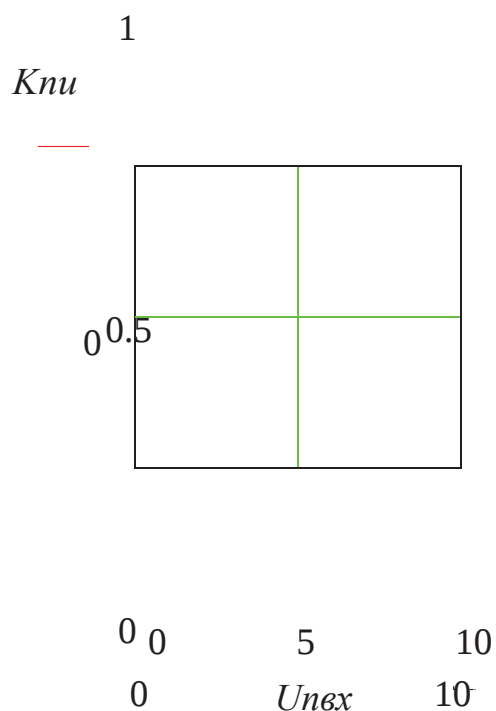


Рис.17. Характеристики зависимости коэффициента перекрёстных искажений от уровня помехи

По результатам лабораторной работы необходимо составить индивидуальный отчет, содержащий иллюстративный материал зависимостей $K_{ПИ} = f(U_{П_вх})$, временные и частотные диаграммы выходных сигналов.

Отчет должен содержать:

Функциональную схему установки для исследования перекрестных искажений.

Расчет коэффициента перекрестных искажений.

1. Графики зависимостей коэффициента перекрестных искажений от уровня помехи.
2. Временные и частотные диаграммы выходных сигналов.
3. Заполненные таблицы результатов исследований.
4. Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Что такое перекрестные искажения в радиоэлектронных средствах.
2. Поясните причину возникновения перекрестных искажений в приемниках радиоэлектронных средств.
3. Чем определяется допустимый уровень помехового сигнала?
4. В чем принципы количественной оценки ЭМС РЭС?
5. Оценка уровня межсистемных помех.
6. Способы подавления внеполосных помеховых излучений РЭС.
7. Каковы этапы оценки ЭМС РЭС и в чем их основная сущность?
8. Классификация электромагнитных помех.
9. Типовые параметры электромагнитных радиоволн передатчиков РЭС.
10. Характеристики излучения радиопередающих устройств.
11. Запишите наиболее неблагоприятные комбинационные частоты, возникающие при одночастотном, многочастотном режиме работы усилителя мощности.

Литература

1. М. Быховуский и др. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Том 2. Обеспечение электромагнитной совместимости радиосистем. – М.: Красанд, 2012.
2. Д. Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. – М.: Книга по Требованию, 2012.
3. С.Б. Стукалов. Электромагнитная совместимость. Пособие по изучению дисциплины и контрольные задания М. МГТУ ГА. 2017. 32 с.

Лабораторная работа № 3.

Исследование ослабления помех фильтрами ВЧ сигналов в задачах электромагнитной совместимости

Цель работы: исследовать работу полосовых и заграждающих фильтров в цепях высокочастотных сигналов для задач электромагнитной совместимости РЭС.

Краткие сведения из теории

Для ослабления действия помех, действующих на приемники электромагнитных излучений (рецепторы) или помех создаваемых источниками электромагнитных излучений, можно применить электрические фильтры (рис.18)[1].

Рис.18. Схема ослабления помех, действующих на рецептор или создаваемых источником

фильтр 1 – фильтр в цепи высокочастотного сигнала,

фильтр 2 – фильтр в фидерном тракте, *фильтр 3* – поглощающий фильтр в виде ферритового кольца для ослабления высокочастотных кондуктивных помех.

Ослабление помеховых ВЧ сигналов можно выполнить при помощи полосовых фильтров в цепях высокочастотного сигнала, в фидерном тракте. Это обеспечивает снижение восприимчивости радиоприемников к непреднамеренным электромагнитным помехам. В зависимости от конкретных условий используемые фильтры могут иметь частотные характеристики фильтров нижних частот, полосовых или режекторных. По принципу действия эти фильтры могут быть реактивными, составленными из частотно- избирательных элементов с малыми потерями, так и поглощающего типа.

Программа работы

1. Исследование работы полосовых фильтров РЭС при пропускании полезных радиосигналов

В данном задании исследуется процесс пропускания полосовыми фильтрами радиоимпульсов радиоэлектронного устройства с заданной несущей частотой.

Для формирования радиоимпульсов необходимо включить и настроить устройства формирования последовательностей прямоугольных видеоимпульсов и затем формирователя сигнала несущей частоты.

Для этого необходимо:

включить схему измерения (установлена на месте ПЭВМ). Устройство включает многофункциональный генератор, формирующий сигналы с заданными параметрами, осциллограф и анализатор спектра. Главная панель приведена на рис. 19.

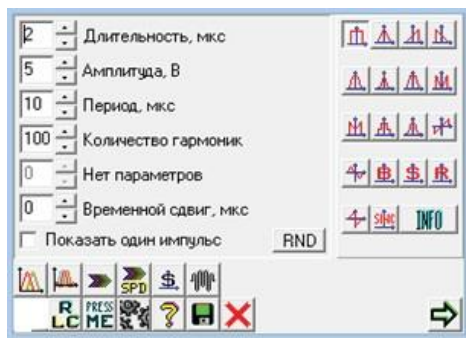


Рис. 19

Включить кнопку формирователя прямоугольных импульсов и убедиться в работе генератора по изображению сигнала на экране осциллографа.

Установить параметры сигналов:

*длительность 2 мкс, амплитуда 5В, период 10 мкс,
количество гармоник (для восстановления сигнала) 100,
временной сдвиг 0 мкс.*

Перевести функциональный генератор в режим формирования последовательности прямоугольных импульсов, нажав кнопку «**Модуляция сигнала**» (рис.20).

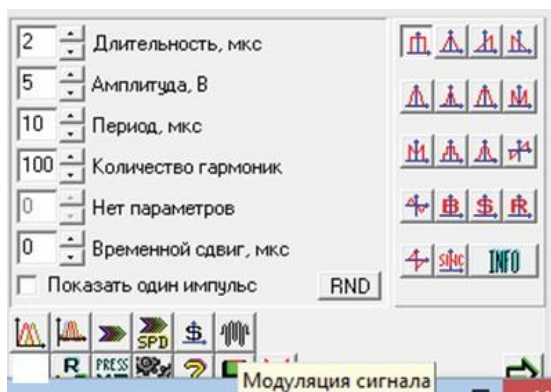


Рис.20

Нажатием зеленой кнопки «**INFO**» высветить информацию о типе сигнала (рис.21).

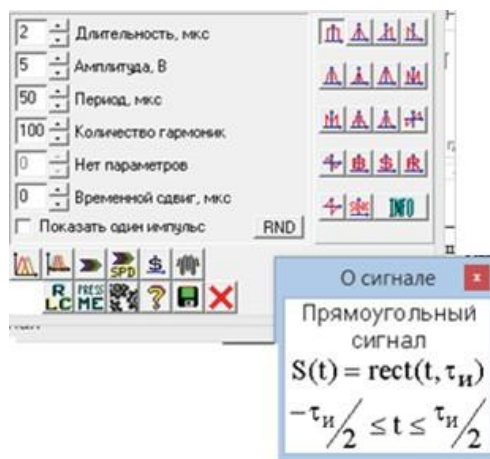


Рис.21 Записать информацию о типе сигнала.

Включить кнопку «модуляция» (снизу второй ряд, правая)

На генераторе частоты «Установка модуляции»), включить кнопку «ON» радиозаполнение и установить частоту радиозаполнения $f_H = 1000$ кГц (рис.22).

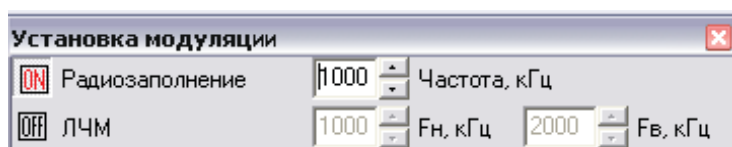


Рис. 22

Зарисовать временную диаграмму входного радиосигнала, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры. Записать выводы о распределении энергии сигнала в частотном диапазоне.

Для исследования пропускания полосовыми фильтрами радиоимпульсов включить кнопку **RLC** (нижний ряд, вторая слева) (рис.23).

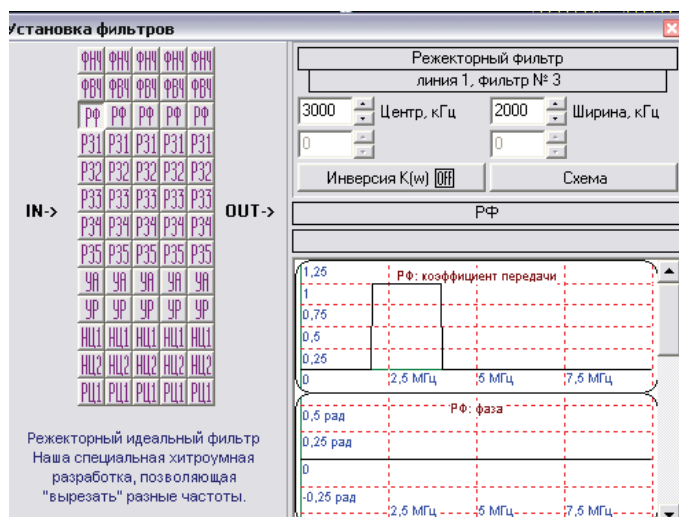


Рис.23

Включить кнопку «РФ». Настроить центральную частоту на значение несущей частоты радиоимпульсов. Ширину полосы пропускания установить $100 \cdot n$ кГц, где n – номер рабочего места.

Зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров.

Последовательно увеличить полосу пропускания фильтра в **1,5 раза** и в **2** раза.

Для данных случаев зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров. Сделать выводы о влиянии полосы пропускания фильтра на качество формируемого сигнала.

Исследование работы заграждающих фильтров РЭС при подавлении гармоник побочного излучения

Настроить формирователь радиосигналов на частоту 1 гармоники **побочного излучения**, т.е. увеличить несущую частоту в 2 раза (установить $f_H = 2000$ кГц).

Включить клавишу «Инверсия $K(\omega)$ ON» (рис.24).

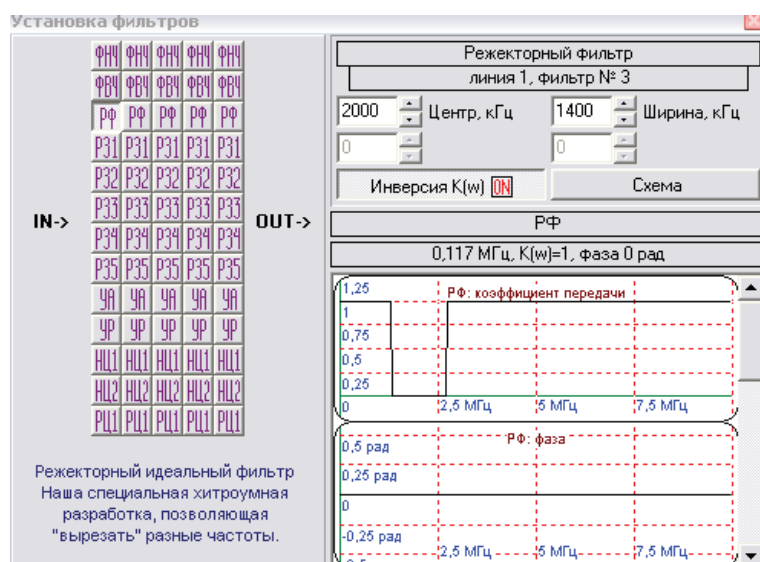


Рис.24

Обратить внимание на изменение амплитудно-частотного спектра пропускаемой гармоники.

Зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров.

Последовательно увеличить полосу подавления фильтра в **1,5 раза** и в **2** раза.

Для данных случаев зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров. Сделать выводы об эффекте подавления гармоник побочного излучения режекторным фильтром.

Контрольные вопросы

1. Методы обеспечения защиты электрических цепей РЭС от помеховых воздействий.
2. Дайте определение ЭМС РЭС.
3. Что такое необходимая полоса частот радиоизлучения?
4. Охарактеризуйте основное излучение радиопередающих устройств. Приведите иллюстрационный материал.
5. Дайте определение побочных каналов излучения.
6. Что такое восприимчивость приемника?
7. За счет чего формируются основной и побочный каналы приема?
8. Поясните физические процессы, обуславливающие прямое прохождение помех в приемных трактах.
9. Дайте физическое обоснование природы тепловых шумов.
10. Чем определяется ширина спектра дробового шума? Запишите выражение.
11. Поясните природу побочных излучений. Дайте количественную оценку динамического диапазона.
12. Изобразите основные схемы возбудителей. Проведите их сравнительный анализ с точки зрения возникновения комбинационных излучений.

Литература

1. Ю.Е. Седельников. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Учебное пособие. Казань. Новое знание. 2006. 304 с.
2. Д.Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. – М.: Книга по Требованию, 2012.
3. С.Б. Стукалов. Электромагнитная совместимость. Пособие по изучению дисциплины и контрольные задания М. МГТУ ГА. 2017. 32 с.

Лабораторная работа № 4.

Исследование ослабления помех развязывающими фильтрами в задачах электромагнитной совместимости

Цель работы: исследовать работу развязывающих фильтров в задачах обеспечения электромагнитной совместимости РЭС.

Краткие сведения из теории

Методы фильтрации находят применение при ослаблении кондуктивных помех, создаваемых источниками в цепях электропитания и управления в различных электронных устройствах для снижения восприимчивости их к непреднамеренным электромагнитным помехам по цепям электропитания и т.д. (рис.25) [1].

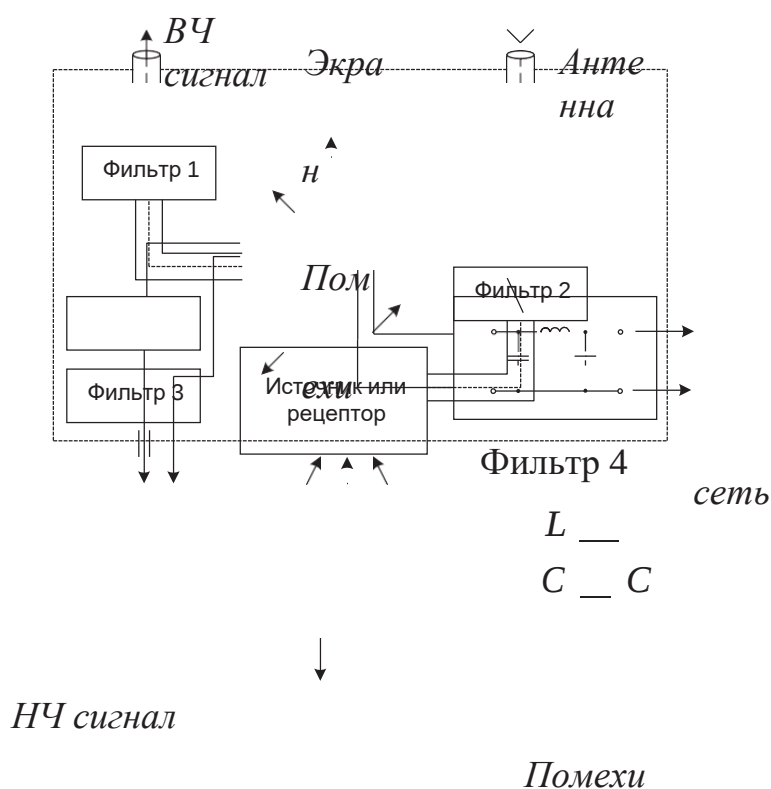


Рис.25. Схема ослабления помех, действующих на приемник или создаваемых источником.

фильтр 1 – фильтр в цепи высокочастотного сигнала,

фильтр 2 – фильтр в фидерном тракте, *фильтр 3* – поглощающий фильтр в виде ферритового кольца для ослабления высокочастотных кондуктивных помех, *фильтр 4* – сетевой развязывающий фильтр.

В зависимости от конкретных условий используемые фильтры могут иметь частотные характеристики фильтров нижних частот, полосовых или режекторных. По принципу действия эти фильтры могут быть реактивными, составленными из частотно-избирательных элементов с малыми потерями, так и поглощающего типа.

Программа работы

Исследование работы развязывающих фильтров РЭС:

В данном задании исследуется процесс подавления развязывающими фильтрами радиоимпульсов с заданной несущей частотой.

Для формирования радиоимпульсов необходимо включить и настроить устройства формирования последовательностей прямоугольных видеоимпульсов и затем формирователя сигнала несущей частоты.

Для этого необходимо:

включить схему измерения (установлена на рабочем месте ПЭВМ), включающую многофункциональный генератор, формирующий сигналы с заданными параметрами, осциллограф и анализатор спектра. Главная панель приведена на рис. 26.

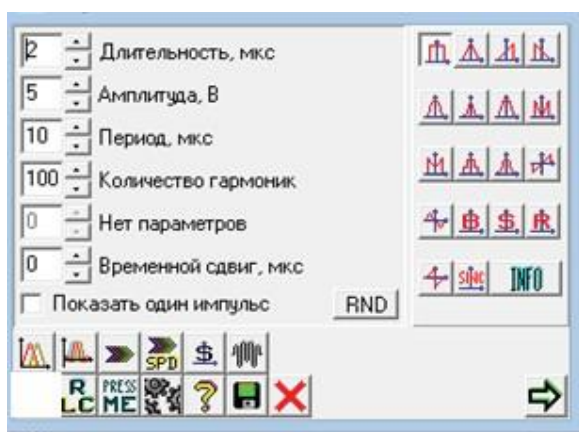


Рис. 26.

Включить кнопку формирователя прямоугольных импульсов и убедиться в работе генератора по изображению сигнала на экране осциллографа.

Установить параметры сигналов:

длительность 2 мкс, амплитуда 5В, период 10 мкс,

количество гармоник (для восстановления сигнала) 100, временной сдвиг 0 мкс.

Перевести функциональный генератор в режим формирования последовательности прямоугольных импульсов, нажав кнопку модуляция (рис.27).

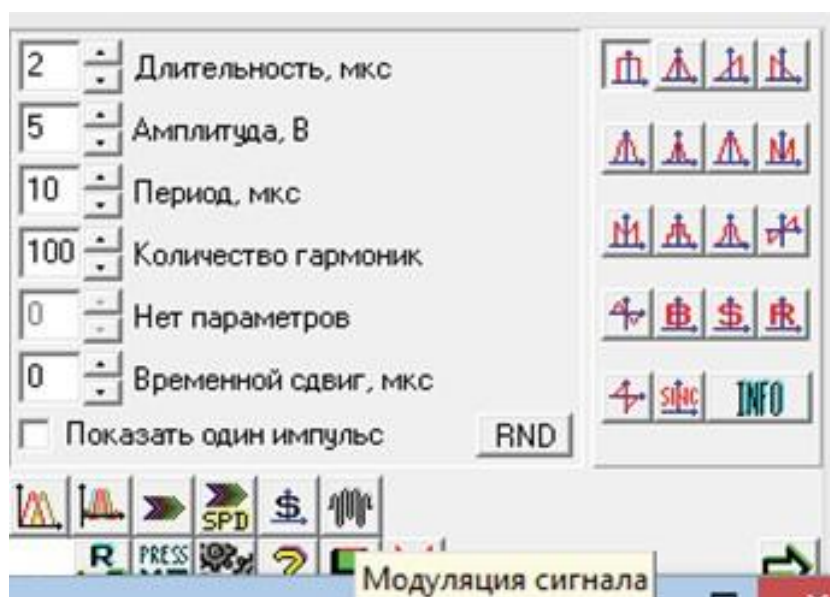


Рис.27

Нажатием зеленой кнопки «INFO» высветить информацию о типе сигнала (рис.28).

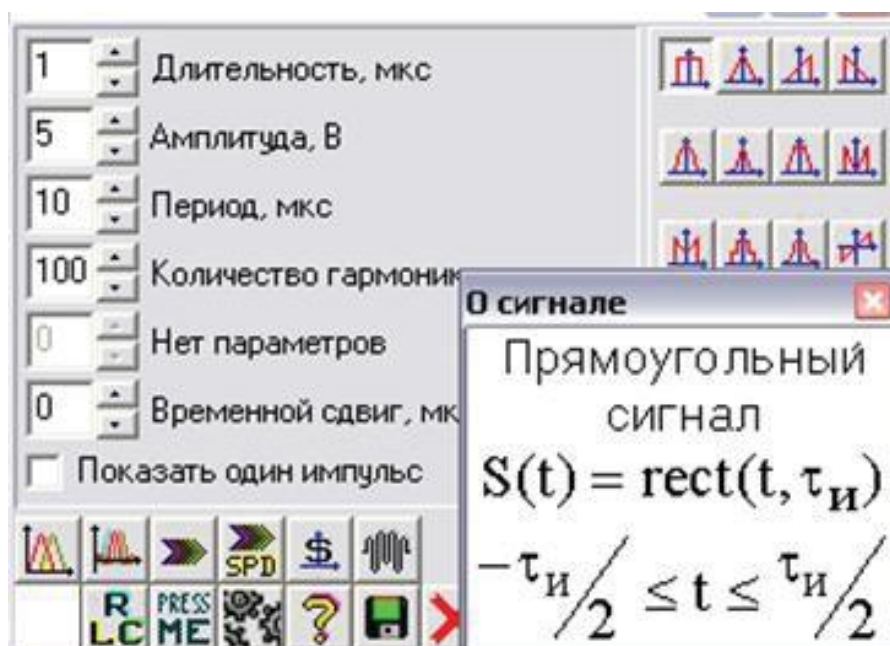


Рис.28 Записать информацию о типе сигнала.

Включить кнопку «модуляция» (снизу второй ряд, правая)

На генераторе частоты «Установка модуляции», включить кнопку «ON» радиозаполнение и установить частоту радиозаполнения $f_n = 100 \cdot n$ кГц, где n – номер рабочего места, (рис.28).

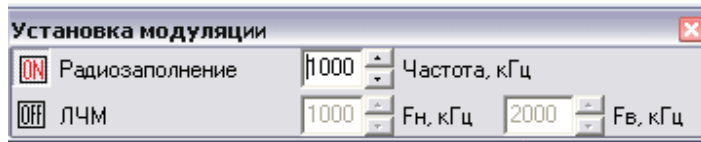


Рис.29

Зарисовать временную диаграмму входного радиосигнала, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры. Записать выводы о распределении энергии сигнала в частотном диапазоне.

Для исследования эффекта подавления развязывающими фильтрами нежелательных радиосигналов включить кнопку **RLC** (нижний ряд, вторая слева). Включить кнопку «ФНЧ». Настроить центральную частоту на значение несущей частоты радиоимпульсов. Ширину полосы пропускания установить $100 \cdot n$ кГц, где n – номер рабочего места, (рис.28).

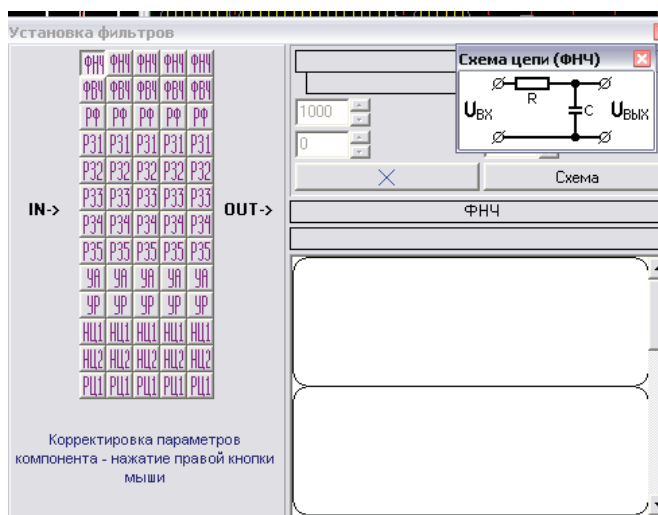


Рис.30

Зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров.

Последовательно увеличить полосу пропускания фильтра в **1,5 раза** и в **2** раза.

Для данных случаев зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров. Сделать выводы о влиянии полосы пропускания фильтра на качество формируемого сигнала.

Исследование работы влияние заграждающих фильтров на подавление гармоник побочного излучения:

Настроить формирователь радиосигналов на частоту 1 гармоники **побочного излучения**, т.е. увеличить несущую частоту в 2 раза (установить $f_H = 2000$ кГц).

Включить клавишу «Инверсия $K(\omega)$ ON» (рис.31).

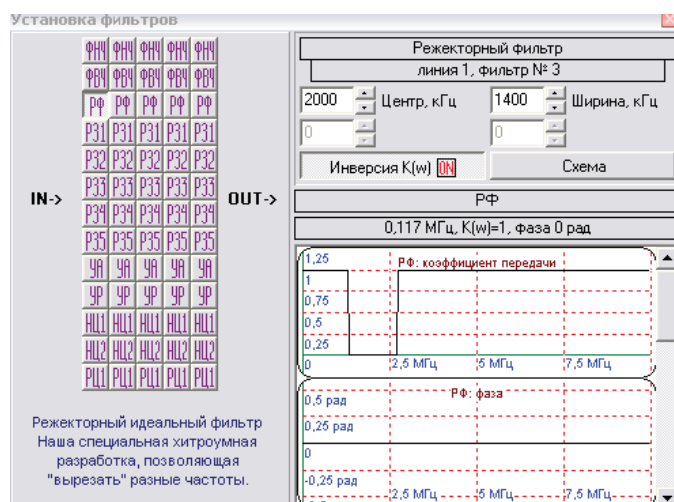


Рис.31

Обратить внимание на изменение **АЧС** пропускаемой гармоник.

Зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров.

Последовательно увеличить полосу подавления фильтра в **1,5 раза** и в **2** раза.

Для данных случаев зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров. Сделать выводы об эффекте подавления гармоник побочного излучения режекторным фильтром.

Контрольные вопросы

1. Поясните механизм возникновения интермодуляционных излучений.
2. Поясните механизм возникновения паразитных излучений.
3. Приведите модели различных нежелательных излучений.
4. Приведите параметры приемников, влияющих на ЭМС РЭС.
5. Дайте определение характеристики частотной избирательности по различным каналам приема.
6. Постройте математические модели оценки характеристики частотной избирательности по соседним каналам приема.

Литература

1. Ю.Е. Седельников. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Учебное пособие. Казань. Новое знание. 2006. 304 с.
2. М. Быховуский и др. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Том 2. Обеспечение электромагнитной совместимости радиосистем. – М.: Красанд, 2012.
3. С.Б. Стукалов. Электромагнитная совместимость. Пособие по изучению дисциплины и контрольные задания М. МГТУ ГА. 2017. 32 с.
4. Д.Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. – М.: Книга по Требованию, 2012. 464 с.

Лабораторная работа №5.

Исследование подавления внеполосных помеховых излучений РЭС

Цель работы: исследовать работу устройств подавления нежелательных внеполосных помеховых излучений в задачах *обеспечения электромагнитной совместимости РЭС*.

Краткие сведения из теории

При передаче речевых сообщений (при амплитудной модуляции) внеполосные излучения возникают в радиопередатчике из-за амплитудного ограничения сигнала. Амплитудное ограничение используется для повышения помехозащищенности путем снижения пик-фактора речевых сообщений. За счет ограничения увеличивается средняя мощность слабых составляющих сигнала (согласные звуки) и уменьшается средняя мощность пиковых составляющих (гласные звуки). При этом не снижается разборчивость речи, поскольку имеется информационная избыточность. Однако, окраска передаваемой речи несколько теряется.

При передаче речевых сообщений при частотной модуляции внеполосные излучения возникают из-за амплитудного ограничения на выходе усилителя низкой частоты.

При передаче телеграфных сообщений внеполосные излучения возникают из-за крутых фронтов телеграфных посылок. Для уменьшения внеполосных излучений рекомендуется заваливать фронты посылок в пропорции

$$\frac{t_{уст}}{t} = 0.15 \dots 0.2$$

где $t_{уст}$ – время нарастания и спада фронтов посылки;

t – общая длительность посылки.

Для заваливания фронтов посылок на выходе манипулирующего каскада обычно ставится фильтр нижних частот (рис.32).

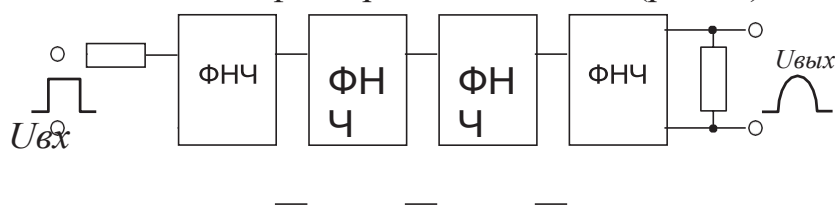


Рис.32

Этим способом обеспечивается изменение структура спектра, его ширины (табл.1) и подавление нежелательных излучений.

Таблица 4

Форма посылок	Ширина занимаемой полосы частот
Прямоугольная	20,6 1/t
Трапецеидальная тверш / тосн = 0,8	6,5 1/t
Треугольная	2,6 1/t
Косинусоидальная	2,5 1/t

Исследование эффектов подавления внеполосных помеховых излучений РЭС создаваемых последовательностями прямоугольных видеоимпульсов:

В данном задании исследуется процесс подавления фильтрами низких частот внеполосных помеховых излучений РЭС создаваемых последовательностями прямоугольных видеоимпульсов.

Для формирования последовательностей прямоугольных видеоимпульсов необходимо включить и настроить устройства формирования сигналов.

Для этого необходимо:

включить схему измерения (установлена на рабочем месте ПЭВМ), включающую многофункциональный генератор, формирующего сигналы с заданными параметрами, осциллограф и анализатор спектра. Главная панель приведена на рис. 33.

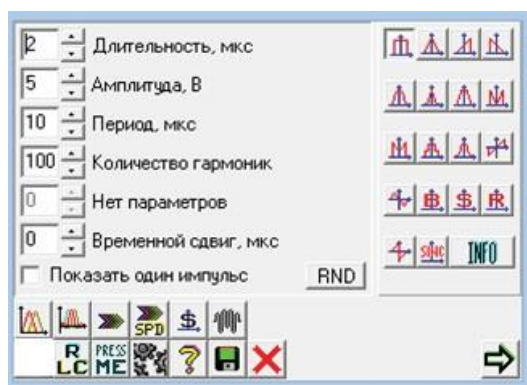


Рис. 33

Включить кнопку формирователя прямоугольных импульсов и убедиться в работе генератора по изображению сигнала на экране осциллографа.

Установить параметры сигналов:

длительность $t_u = 2$ мкс, амплитуда $5V$,

период $T = 10$ мкс,

количество гармоник (для восстановления сигнала) 100,

временной сдвиг 0 мкс.

Перевести функциональный генератор в режим формирования последовательности прямоугольных импульсов, нажав кнопку модуляция (рис.34).

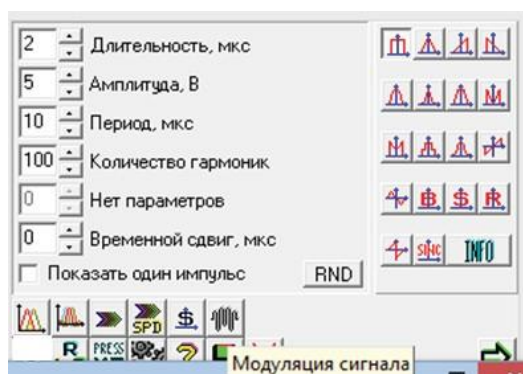


Рис.34

Нажатием зеленой кнопки «INFO» высветить информацию о типе сигнала (рис.35).

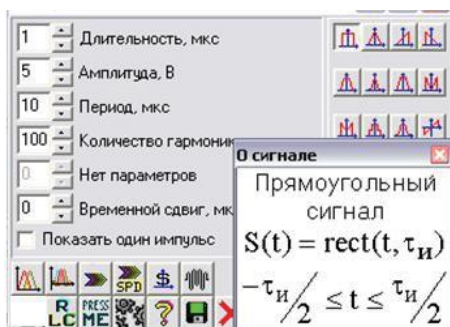


Рис.35

Записать информацию о типе сигнала.

Зарисовать временную диаграмму входного сигнала, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры. Записать выводы о распределении энергии сигнала в частотном диапазоне.

Для исследования эффекта подавления фильтрами низких частот нежелательных радиосигналов включить кнопку **RLC** (нижний ряд, вторая слева). Включить кнопку «ФНЧ» (рис.36).

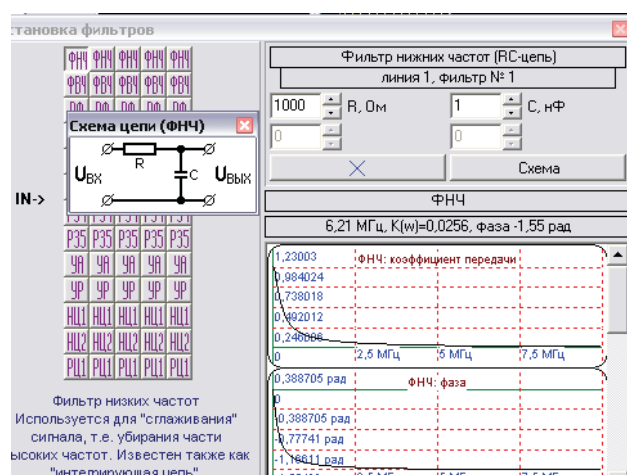


Рис.36

Установить сопротивление резистора R равным $100 \cdot n$ Ом, где **n –номер рабочего места**. Значение емкости C установить из условия граничной частоты фильтра $f_{гр} = 1/\tau_i$. Для расчета воспользоваться формулой:

$$C = \frac{1}{2\pi R f_{гр}}$$

Зарисовать временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, АЧХ и ФЧХ фильтров.

Исследование качества действия фильтров подавления внеполосных излучений при многокаскадном включении:

Последовательно включить дополнительно второй ФНЧ, затем третий ФНЧ.

Для данных случаев зарисовать схемы фильтров, временные диаграммы входного и выходного сигналов, амплитудно-частотный и фазочастотный спектры, *результатирующие* АЧХ и ФЧХ фильтров.

Сделать выводы о качестве подавления фильтрами нежелательных внеполосных помеховых излучений в зависимости от количества каскадов.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте основное излучение радиопередающих устройств.
2. Дайте определение побочных каналов излучения.
3. За счет чего формируются основной и побочный каналы приема?
4. Поясните физические процессы, обуславливающие прямое прохождение помех в приемных трактах.
5. Классификация электромагнитных помех.
6. Типовые параметры электромагнитных радиоволн передатчиков РЭС.
7. Характеристики излучения радиопередающих устройств.
8. Математические модели описания параметров электромагнитной совместимости.

Литература

1. М. Быховуский и др. Основы управления использованием радиочастотного спектра. Том 2. Обеспечение электромагнитной совместимости радиосистем. – М.: Красанд, 2012.
2. Д. Уайт. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. – М.: Книга по Требованию, 2012.
3. С.Б. Стукалов. Электромагнитная совместимость. Пособие по изучению дисциплины и контрольные задания М. МГТУ ГА. 2017. 32 с.

Лабораторная работа №6

Исследование побочных излучений радиоэлектронных средств

Общие положения

Измерения осуществляются на основании решения ГКРЧ от 1 июля 2016 г. № 16-37-02 «Об утверждении общих требований и рекомендаций по методам измерений и контроля характеристик РЭС, влияющих на электромагнитную совместимость».

Допустимая ширина полосы радиочастот и внеполосных излучений должны соответствовать требованиям Норм 18-13 «Радиопередающие устройства гражданского назначения. Требования на допустимые уровни побочных излучений. Методы контроля».

Технические и программные средства, используемые во время измерений

Для реализации процедуры методики используются следующие технические средства, приведенные в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Технические и программные средства, используемые во время методики

Наименование оборудования	Количество, шт.	Примечание
Персональный компьютер ПК для обработки результатов тестирования	1	Специальных требований не предъявляется
Анализатор частоты «Anritsu»	1	Диапазон измеряемых частот от 30 до 4500 (МГц)
Программное обеспечение «Master Software Tools» для сбора данных из анализатора частоты.	1	
Радиопередатчик	1	
Кабель с переходником для подключения радиопередатчика к анализатору частоты	1	
Кабель для подключения анализатору частоты к ПК через	1	

интерфейс USB		
---------------	--	--

Условия измерений

Испытуемый радиопередатчик является частью РБЛА. Условия измерений совпадают с условиями эксплуатации РБЛА и условиями, в которых разрешено использование СИ производителя «Anritsu».

Условия окружающей среды для эксплуатации РБЛА:

диапазон рабочих температур (°C) – от «минус» 20 до «плюс» 40;

давление (мм. рт. ст.) – 760;

относительная влажность (%) – не более 95.

Условия для эксплуатации СИ производителя «Anritsu»:

Диапазон рабочих температур – от «минус» 10 до «плюс» 55;

давление (мм. рт. ст.) – 760;

относительная влажность (%) – не более 95% при 30 °C.

Климатические условия измерений, при которых должны обеспечиваться заданные характеристики, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к техническим средствам в части условий их эксплуатации.

Тестирование и апробация должны проводиться в нормальных климатических условиях по ГОСТ 22261-94. Этими условиями являются:

– температура окружающего воздуха (°C) – 20 ± 5 ;

– относительная влажность (%) – от 30 до 80;

– атмосферное давление (кПа) – от 84 до 106.

Нормальные климатические условия соответствуют условиям эксплуатации РБЛА и СИ.

Подготовка к выполнению измерений

Для проведения измерений убедиться в отсутствии источников электромагнитного излучения в диапазоне измеряемых частот.

Подготовить СИ производителя «Anritsu» согласно «Руководству по эксплуатации», а именно время прогрева прибора и выхода на режим занимает

60 сек. Запустить на ПК «Master Software Tools» и установить связь по интерфейсу USB.

Подключить устройства согласно схеме измерения, указанная на рис. 6.1.

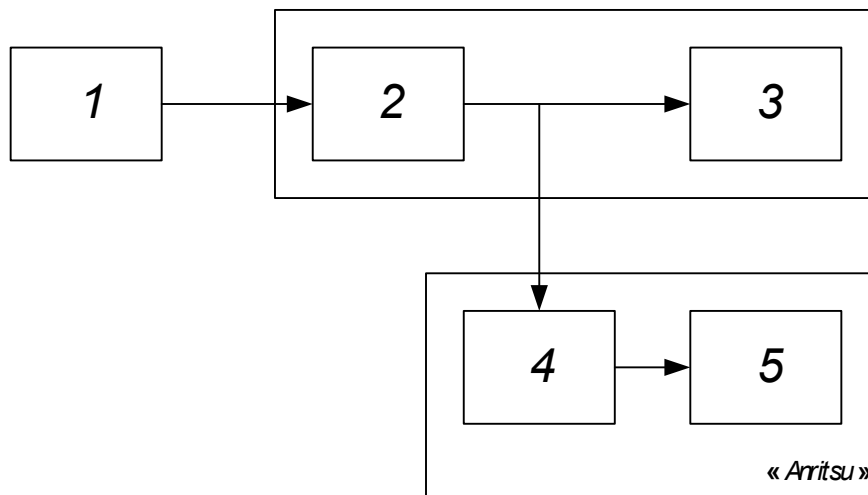


Рисунок 6.1 Схема подключения оборудования при измерении частоты радиопередатчика.

На рис. 6.1 отображены: 1 – контролируемый радиопередатчик; 2 – устройство связи; 2 – устройство связи; 3 – эквивалентное нагрузочное сопротивление (эквивалент антенны); 4 – аттенюатор; 5 – измеритель мощности. Аттенюатор и измеритель мощности находятся внутри СИ производителя «Anritsu».

Методика измерений

Измерения проводятся в соответствии с методикой контроля побочных излучений радиопередатчиков с использованием анализатора спектра.

Рекомендуемые полосы пропускания измерительного приемника, используемые при измерениях уровней побочных излучений для диапазона рабочей частоты передатчика $30 \text{ МГц} < f_0 \leq 1 \text{ ГГц}$, составляет $B_i = 100 \text{ кГц}$.

Диапазон частот контроля побочных излучений располагается ниже и выше области внеполосных излучений радиопередатчика и определяется нижней F_n и верхней F_v границами (см. рис. 6.2).

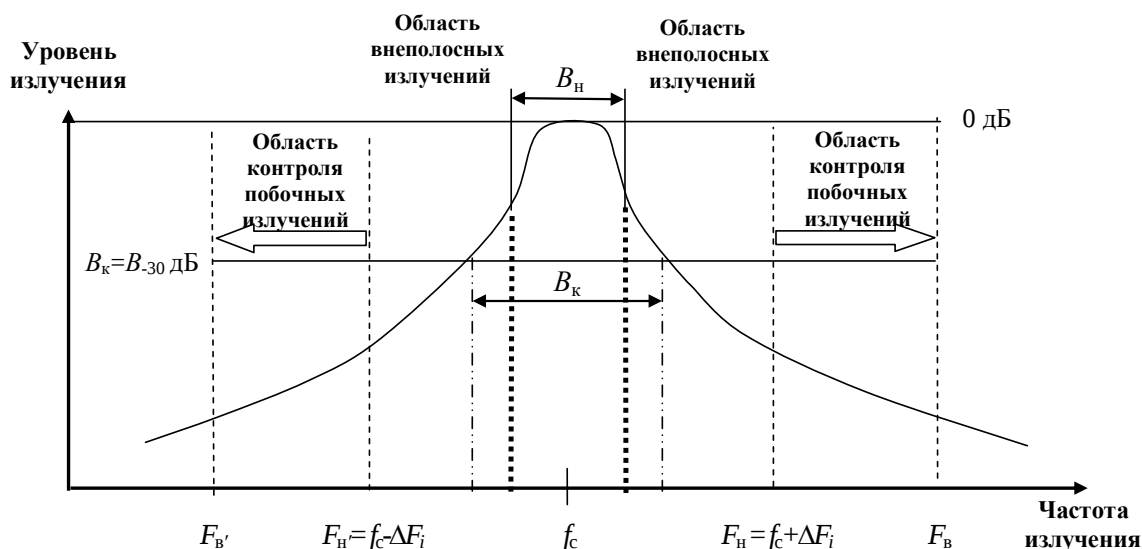


Рисунок 6.2 Области контроля побочных излучений.

Разнос частот (отстройка ΔF_i) между центральной частотой основного излучения f_c и нижней границей F_n измерений в области побочных излучений для полосы рабочих частот $30 \text{ МГц} < f_c \leq 1 \text{ ГГц}$ для промежуточных значений B_n рассчитывается по формуле (см. таблице 1 Норм 18-13):

$$\Delta F_i = 2,5 B_n. \quad (6.1)$$

Границы диапазона частот контроля побочных излучений ниже области внеполосных излучений $F_{в'}$ и выше области внеполосных излучений $F_{в}$ определяется по таблице 6.1 Норм 18-13 для частотного диапазона от 600 МГц до 5200 МГц:

Таблица 6.1 – Верхняя граница $F_{в}$ диапазона частот контроля побочных излучений

Частотный диапазон радиопередатчика	Границы диапазонов измерений побочных излучений	
	Ниже области внеполосных излучений ($F_{в'}$)	Выше области внеполосных излучений ($F_{в}$)
600 МГц – 5200 МГц	30 МГц	5-я гармоника

По таблице 3 Норм 18-13 норма на допустимые уровни побочных излучений радиопередающих устройств на частотах выше 30 МГц составляет:

Таблица 6.2 – Допустимые уровни побочных излучений радиопередающих устройств

Минимально допустимое ослабление ПИ $A_{\text{пи}}$ (дБ) относительно уровня мощности на выходе радиопередатчика (применяются менее жесткие требования)	Максимально допустимая мощность в области побочных излучений P_i (в дБм) при соответствующих ширине полосы и мощности P ($P_{\text{пик}}$)
$A_{\text{пи}} = 43 + P$, где P – мощность, дБВт, или $A_{\text{пи}} = 70$	При $P \leq 500$ Вт $P_i = -13$; при $P > 500$ Вт $P_i = (P - 40)$, где P – мощность, дБВт

Испытуемый радиопередатчик удовлетворяет норме, если выполняется условие:

$$|P_{\text{отн}}| \geq |A_{\text{пи}}|, \quad (6.2)$$

Лабораторная работа №7

Исследование ширины полосы частот и внеполосных излучений

Общие положения

Методика измерений осуществляется на основании решения ГКРЧ от 1 июля 2016 г. № 16-37-02 «Об утверждении общих требований и рекомендаций по методам измерений и контроля характеристик РЭС, влияющих на электромагнитную совместимость».

Допустимая ширина полосы радиочастот и внеполосных излучений должны соответствовать требованиям Норм 19-13 «Нормы на ширину полосы радиочастот и внеполосные излучения радиопередатчиков гражданского применения».

Технические и программные средства, используемые во время измерений

Для реализации процедуры методики используется следующие технические средства, приведенные таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Технические и программные средства, используемые во время методики

Наименование оборудования	Количество, шт.	Примечание
Персональный компьютер ПК для обработки результатов тестирования	1	Специальных требований не предъявляется
Анализатор частоты «Anritsu»	1	Диапазон измеряемых частот от 30 до 4500 (МГц)
Программное обеспечение «Master Software Tools» для сбора данных из анализатора частоты.	1	
Радиопередатчик	1	
Кабель с переходником для подключения радиопередатчика к анализатору частоты	1	
Кабель для подключения анализатору частоты к ПК через интерфейс USB	1	

Условия измерений

Испытуемый радиопередатчик является частью РБЛА. Условия измерений совпадают с условиями эксплуатации РБЛА и условиями, в которых разрешено использование СИ производителя «Anritsu».

Условия окружающей среды для эксплуатации РБЛА:

диапазон рабочих температур (°C) – от «минус» 20 до «плюс» 40;

давление (мм. рт. ст.) – 760;

относительная влажность (%) – не более 95.

Условия для эксплуатации СИ производителя «Anritsu»:

Диапазон рабочих температур – от «минус» 10 до «плюс» 55;

давление (мм. рт. ст.) – 760;

относительная влажность (%) – не более 95% при 30 °C.

Климатические условия измерений, при которых должны обеспечиваться заданные характеристики, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к техническим средствам в части условий их эксплуатации.

Тестирование и апробация должны проводиться в нормальных климатических условиях по ГОСТ 22261-94. Этими условиями являются:

– температура окружающего воздуха (°C) – 20 ± 5 ;

– относительная влажность (%) – от 30 до 80;

– атмосферное давление (кПа) – от 84 до 106.

Нормальные климатические условия соответствуют условиям эксплуатации РБЛА и СИ.

Подготовка к выполнению измерений

Для проведения измерений убедиться в отсутствии источников электромагнитного излучения в диапазоне измеряемых частот.

Подготовить СИ производителя «Anritsu» согласно «Руководству по эксплуатации», а именно время прогрева прибора и выхода на режим занимает

60 сек. Запустить на ПК «Master Software Tools» и установить связь по интерфейсу USB.

Подключить устройства согласно схеме измерения, указанная на рис. 7.1.

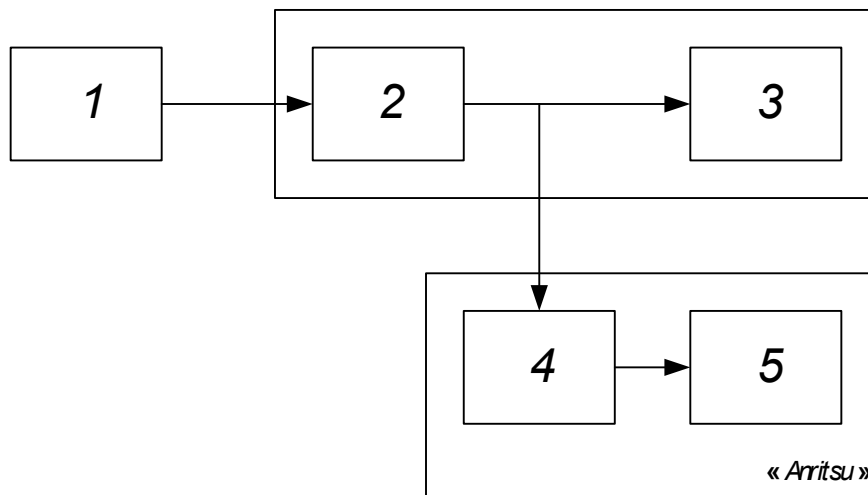


Рисунок 7.1 Схема подключения оборудования при измерении частоты радиопередатчика.

На рис. 7.1 отображены: 1 – контролируемый радиопередатчик; 2 – устройство связи; 2 – устройство связи; 3 – эквивалентное нагрузочное сопротивление (эквивалент антенны); 4 – аттенюатор; 5 – измеритель мощности. Аттенюатор и измеритель мощности находятся внутри СИ производителя «Anritsu».

Методика измерений

Измерения проводятся в соответствии с методикой контроля ширина полосы радиочастот и внеполосных излучений радиопередатчиков с использованием анализатора спектра.

Параметры анализатора спектра устанавливаются исходя из следующих критериев. Амплитуда соответствующей спектральной составляющей на экране анализатора спектра устанавливается на отметку «0 дБ». Полоса пропускания узкополосного тракта анализатора спектра на уровне минус 3 дБ (Δf) при использовании периодических испытательных сигналов выбирается

в 3 раза меньше частоты манипуляции, а для импульсных классов излучений – близкой к $0,1/\tau$.

При контроле импульсных классов излучений форма частотной характеристики узкополосного тракта анализатора спектра должна быть близкой к колоколообразной.

Полоса обзора анализатора спектра Π (а при использовании анализатора спектра, подключаемого к тракту УПЧ приемника, и ширина полосы пропускания приемника) устанавливается в 1,5 – 2 раза шире значений ширины полосы частот, рассчитанных по данным таблицы 4.1 Норм 19-13.

Постоянная времени последетекторного фильтра и время анализа анализатора спектра выбираются в зависимости от класса излучения радиопередатчика. Для цифровых видов модуляции с частотной модуляцией постоянная времени должна быть минимальной из устанавливаемых в анализаторе спектра и время анализа (T) должно удовлетворять условию:

$$T \geq \frac{\Pi}{\Delta f^2}. \quad (7.1)$$

При этом могут использоваться анализаторы спектра с линейным или логарифмическим детектором.

Время анализа прибора, имеющего или линейный, или квадратичный, или логарифмический детектор выбирают исходя из наклона огибающей спектра Q :

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{лин}} &\geq \frac{132,8\Pi}{\Delta f B_{\kappa} [3,4(1+3/Q)]^2} \\ T_{\text{кв}} &\geq \frac{188,8\Pi}{\Delta f B_{\kappa} [3,4(1+3/Q)]^2} \\ T_{\text{лог}} &\geq \frac{18880}{\Delta f B_{\kappa} Q^2} \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

Анализатор спектра должен обеспечивать указанное время анализа.

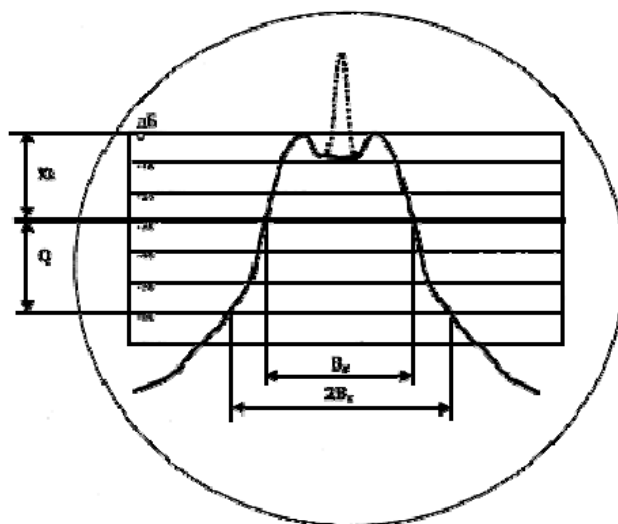


Рисунок 7.2 Оценка величины наклона огибающей спектра.

Оценка величины Q производится перед точными измерениями ширины контрольной полосы частот излучения следующим образом. Полоса обзора анализатора спектра выбирается в 3 – 4 раза шире B_k , после чего величина Q оценивается непосредственно по экрану анализатора спектра с логарифмическим детектором в соответствии с рис. 3.2 или по разности показаний аттенюаторов анализатора спектра при отсчете на отметке шкалы «0 дБ» последовательно значений B_k и $2 \times B_k$.

Для расчета контрольной ширины полосы частот и внеполосных излучений для цифровых видов модуляции сигнала необходимо вычислить индекс частотной модуляции m' по формуле

$$m' = \frac{2D}{R}, \quad (7.3)$$

где

m' – индекс частотной модуляции;

D – пиковая девиация частоты (половина разности между максимальной и минимальной величинами мгновенно частоты), Гц;

R – скорость цифровой передачи данных, бит/сек.

В зависимости от полученного значения индекса частотной модуляции рассчитать необходимую ширину полосы частот по таблице 4.7 Норм 19-13:

$$B_{\text{н}} = 2,4R\sqrt{m'}, \text{ для } 0,5 \leq m' < 1,5 \quad (7.4)$$

$$B_{\text{н}} = 1,2R + 2,4D, \text{ для } 1,5 \leq m' < 5,5 \quad (7.5)$$

$$B_{\text{н}} = 1,9R + 2,1D, \text{ для } 5,5 \leq m' < 20 \quad (7.6)$$

Контрольные ширины полосы частот и внеполосных излучений рассчитываются по формулам:

$$B_{\kappa} = \frac{2,3B_{\text{н}}}{(m'+12)^{1/6}}, \quad (7.7)$$

$$B_{-40} = B_{\kappa} \left[2,86 - (m'+12)^{1/6} \right], \quad (7.8)$$

$$B_{-50} = B_{\kappa} \left[4 - (m'+8)^{1/4} \right], \quad (7.9)$$

$$B_{-60} = B_{\kappa} \left[4,8 - (m'+5)^{1/3} \right]. \quad (7.10)$$

Лабораторная работа №8

Исследование отклонения частоты радиопередатчика

Общие положения

Методика измерений осуществляется на основании решения ГКРЧ от 1 июля 2016 г. № 16-37-02 «Об утверждении общих требований и рекомендаций по методам измерений и контроля характеристик РЭС, влияющих на электромагнитную совместимость».

Допустимые отклонения частоты должны соответствовать требованиям Норм 17-13 «Радиопередатчики всех категорий гражданского применения. Требования на допустимые отклонения частоты».

Технические и программные средства, используемые во время измерений

Для реализации процедуры методики используется следующие технические средства, приведенные таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Технические и программные средства, используемые во время методики

Наименование оборудования	Количество, шт.	Примечание
Персональный компьютер ПК для обработки результатом тестирования	1	Специальных требований не предъявляется
Анализатор частоты «Anritsu»	1	Диапазон измеряемых частот от 30 до 4500 (МГц)
Программное обеспечение «Master Software Tools» для сбора данных из анализатора частоты.	1	
Радиопередатчик	1	
Кабель с переходником для подключения радиопередатчика к анализатору частоты	1	
Кабель для подключения анализатору частоты к ПК через интерфейс USB	1	

Условия измерений

Испытуемый радиопередатчик является частью РБЛА. Условия измерений совпадают с условиями эксплуатации РБЛА и условиями, в которых разрешено использование СИ производителя «Anritsu».

Условия окружающей среды для эксплуатации РБЛА:

диапазон рабочих температур (°C) – от «минус» 20 до «плюс» 40;

давление (мм. рт. ст.) – 760;

относительная влажность (%) – не более 95.

Условия для эксплуатации СИ производителя «Anritsu»:

Диапазон рабочих температур – от «минус» 10 до «плюс» 55;

давление (мм. рт. ст.) – 760;

относительная влажность (%) – не более 95% при 30 °C.

Климатические условия измерений, при которых должны обеспечиваться заданные характеристики, должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к техническим средствам в части условий их эксплуатации.

Тестирование и апробация должны проводиться в нормальных климатических условиях по ГОСТ 22261-94. Этими условиями являются:

– температура окружающего воздуха (°C) – 20 ± 5 ;

– относительная влажность (%) – от 30 до 80;

– атмосферное давление (кПа) – от 84 до 106.

Нормальные климатические условия соответствуют условиям эксплуатации РБЛА и СИ.

Подготовка к выполнению измерений

Для проведения измерений убедиться в отсутствии источников электромагнитного излучения в диапазоне измеряемых частот.

Подготовить СИ производителя «Anritsu» согласно «Руководству по эксплуатации», а именно время прогрева прибора и выхода на режим занимает

60 сек. Запустить на ПК «Master Software Tools» и установить связь по интерфейсу USB.

Подключить устройства согласно схеме измерения, указанная на рис. 8.1.

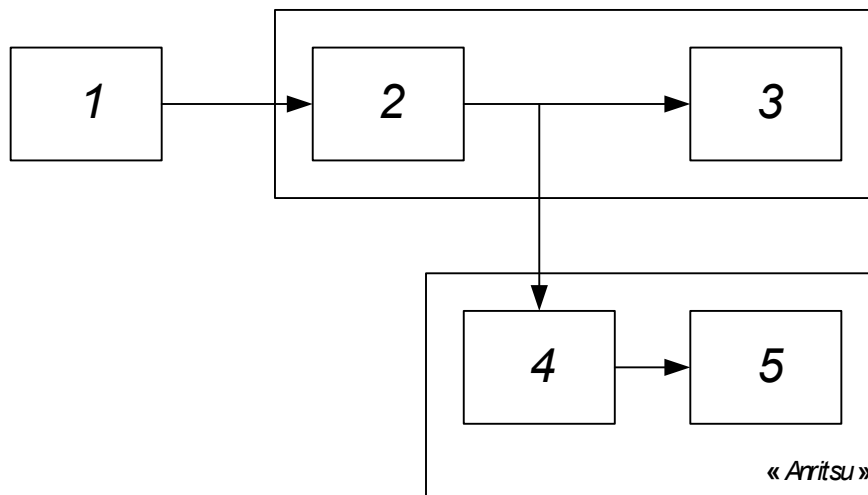


Рисунок 8.1 Схема подключения оборудования при измерении частоты радиопередатчика.

На рис. 8.1 отображены: 1 – контролируемый радиопередатчик; 2 – устройство связи; 2 – устройство связи; 3 – эквивалентное нагрузочное сопротивление (эквивалент антенны); 4 – аттенюатор; 5 – измеритель мощности. Аттенюатор и измеритель мощности находятся внутри СИ производителя «Anritsu».

Методика измерений

Измерения проводятся в соответствии с методикой контроля допустимого отклонения частоты радиопередатчиков с использованием анализатора спектра.

Подготовка к измерениям отклонения частоты с использованием анализатора спектра, настраиваемого по частоте развертки, в части, касающейся выбора испытательного сигнала и установки параметров анализатора спектра, проводится в соответствии с методами измерения ширины полосы радиочастот и внеполосных излучений радиопередатчиков, используемых для контроля требований Норм 19-13 «Нормы на ширину

полосы радиочастот и внеполосные излучения радиопередатчиков гражданского применения».

Вычисляют значение присвоенной полосы частот B_{Π} радиопередатчика по формуле:

$$B_{\Pi} = B_H + (2 \times N_{abc}) \quad (8.1)$$

где

B_{Π} – значение присвоенной полосы частот, Гц;

B_H – значение необходимой ширины полосы частот, Гц;

N_{abc} – норма на допустимое отклонение частоты радиопередатчика.

На спектрограмме, отображенной на экране анализатора спектра, находят две точки, лежащие на пересечении выбранного уровня с составляющими спектра сигнала, превышающими этот уровень, и имеющих минимальную и максимальную частоту. Разность значений по оси частот этих двух точек равна B_{Π} .

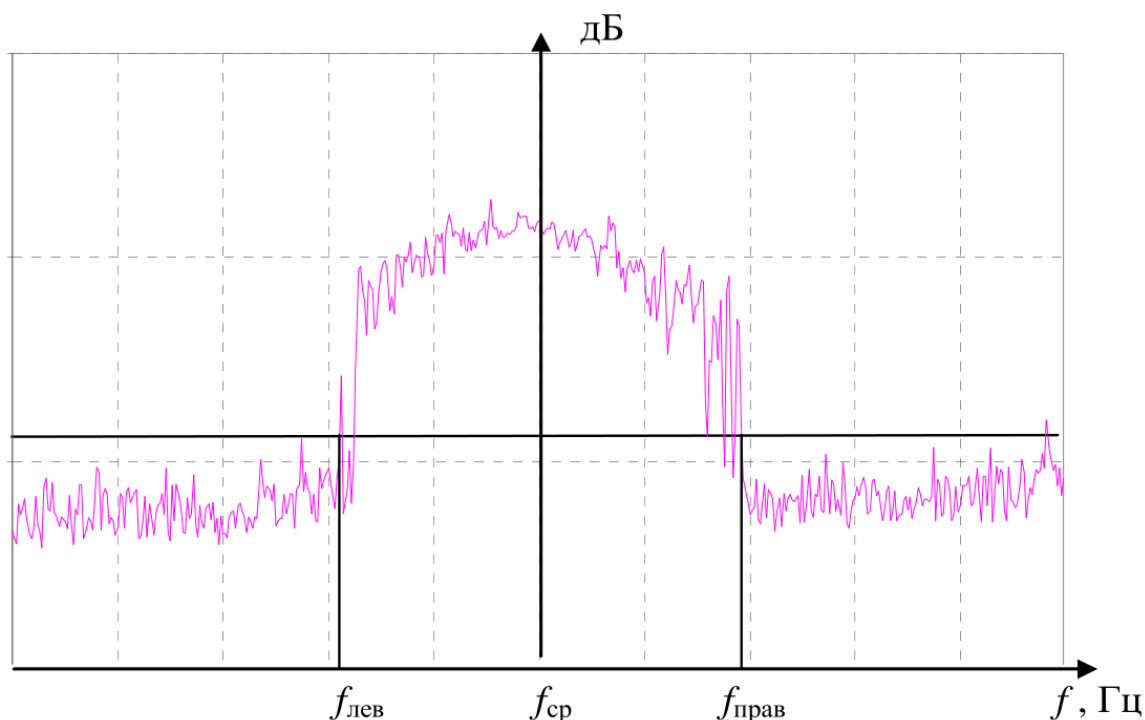


Рисунок 8.2 Иллюстрация метода определения средней частоты.

Порядок действий:

Измеряют значения частот этих точек $f_{лев}$ и $f_{прав}$ (см. рис 8.2);

Вычисляют среднюю частоту присвоенной полосы частот $f_{cp.i}$ и её

отклонение $\Delta f_{cp.i}$ от присвоенной частоты по формулам:

$$\Delta f_{cp.i} = 0,5 \times (f_{лев} + f_{прав}) \quad (8.2)$$

$$\Delta f_{Иi} = |f_{cp.i} - f_{П}| \quad (8.3)$$

$$\Delta f_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta f_{Иi} \quad (8.4)$$

Аналогичную процедуру измерений повторяют n раз, где должно удовлетворять условию $n \geq 10$;

Для каждого i -го измерения по формуле (1.3) рассчитывают величину отклонения $\Delta f_{Иi}$;

Рассчитывают среднее арифметическое значение разностей Δf_{cp} на множестве измерений $n \geq 10$ по формуле (4), в которой $\Delta f_{Иi}$ определено по формуле (8.3);

Контролируемый передатчик удовлетворяет норме, если выполняются условия:

$$\frac{\Delta f_{cp}}{f_{П}} \leq N \times 10^{-6} \quad (8.5)$$

или

$$\Delta f_{cp} \leq N_{абс} \quad (8.6)$$

Лабораторная работа №9

Исследование частотно-территориального планирования

Общие положения

Важнейшим этапом проектирования сетей радиосвязи является процесс частотно-территориального планирования. В ходе планирования выбираются структура сети, места размещения базовых станций, рассчитывается зона покрытия, оценивается возможность получения полос радиочастот, разрабатывается частотно-территориальный план назначения каналов для базовых станций, выполняется адаптация плана к условиям частотных ограничений со стороны спецслужб, формируются зоны обслуживания и оцениваются внутрисистемные помехи. При планировании также проверяется внешняя электромагнитная совместимость проектируемой сети с радиоэлектронными средствами других систем и возможность обеспечения требуемой ёмкости сети для обслуживания с заданным качеством.

Потенциальным заказчикам мы предлагаем услуги по разработке частотно-территориальных планов сетей радиосвязи следующих стандартов: GSM/GSM-R; Wi-Fi; WiMAX; LTE; TETRA; APCO-25; UMTS; cdma2000.

При выполнении частотно-территориального планирования сетей радиосвязи мы решаем следующие задачи:

1. Определение зоны обслуживания сети из анализа распределения предполагаемых абонентов, оценки создаваемой ими нагрузки и доступных финансовых средств.
2. Выбор мест установки базовых станций на базе расчетов.
3. Расчет коэффициента повторного использования частот и разработка частотного плана.
4. Контрольное измерение зон обслуживания.
5. Оптимизация сети в процессе эксплуатации.

Мы также оказываем консультационные услуги на начальном этапе проектирования, а именно помощь в формировании технических требований к проектируемой сети и выборе оборудования.

Подвижная радиосвязь

Важнейшим этапом проектирования сетей широкополосного беспроводного доступа является процесс частотно-территориального планирования. В ходе планирования выбираются окончательная структура (конфигурация) сети, места размещения базовых станций, рассчитывается возможность обеспечения радиопокрытия с заданным качеством связи, разрабатывается частотный план распределения радиоканалов для базовых станций, выполняется адаптация плана к условиям территориальных и частотных ограничений проектируемой зоны обслуживания, формируются зоны обслуживания для каждой базовой станции и сети в целом, оцениваются и минимизируются внутрисистемные помехи. Часто при планировании проверяется внешняя электромагнитная совместимость планируемой системы с РЭС других систем и возможность обеспечения требуемой емкости сети для обслуживания абонентской нагрузки.

С использованием специализированного программного обеспечения и цифровых карт местности мы квалифицированно выполняем частотно-территориальное планирование сетей подвижной радиосвязи различных стандартов, включая DECT, TETRA, GSM, cdma2000, UMTS/HSPA+, WiMAX и LTE.

Основные этапы частотно-территориального планирования сетей подвижной радиосвязи включают в себя:

1. Разработка требований к исходным данным

В техническом задании на выполнение ЧТП должно быть указано:

- тип абонентов, работающих, внутри помещений и вне помещений (процентное соотношение);

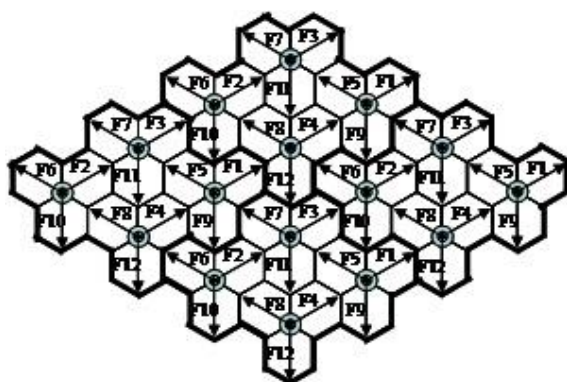
- плотность абонентов на единицу площади или плотность трафика на единицу площади;
- потребность абонентов в скорости трафика (процентное соотношение);
- тип передаваемого трафика;
- тактико-технические параметры на оборудование базовых и абонентских станций согласно Формы №1 ГКРЧ;
- объемом выделенного для развертывания сети радиочастотного ресурса;
- ограничения на высоты подвеса антенн (антенных мачт).

2. Расчет бюджета канала связи

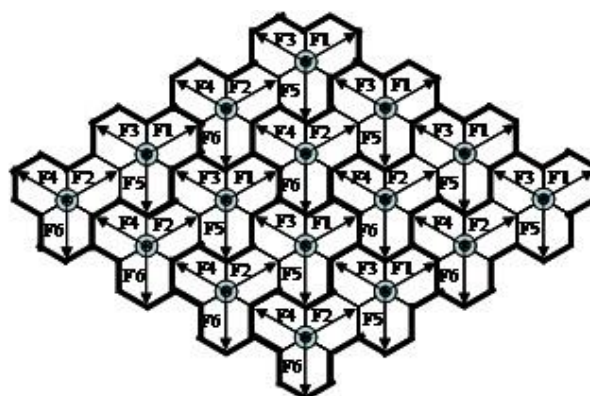
На первом этапе частотно-территориального планирования сети беспроводного широкополосного доступа производится расчет бюджета канала связи для данного оборудования с целью определения максимально допустимых потерь в канале связи и первоначальной оценки радиуса зоны обслуживания. Расчет бюджета потерь проводится для двух направлений: линии вниз (downlink) и вверх (uplink), а в качестве результирующего значения выбирается минимальное из рассчитанных значений.

3. Выбор структуры кластера сети

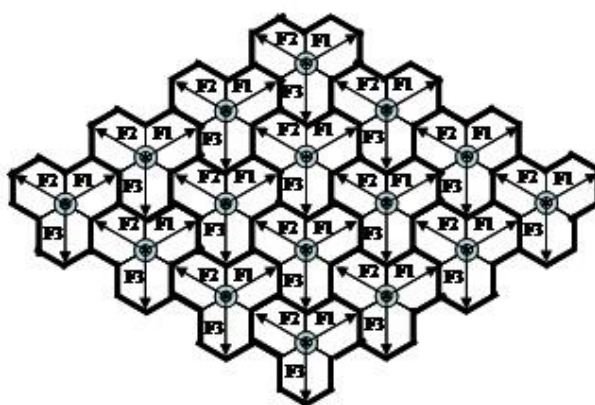
В зависимости от объема радиочастотного ресурса, выделенного оператору сети беспроводного широкополосного доступа возможны различные варианты построения топологии радиочастотного кластера. Возможные варианты структуры кластера для трехсекторных сайтов без использования частичного повторного использования частот приведены ниже.



4x12x3



2x6x3



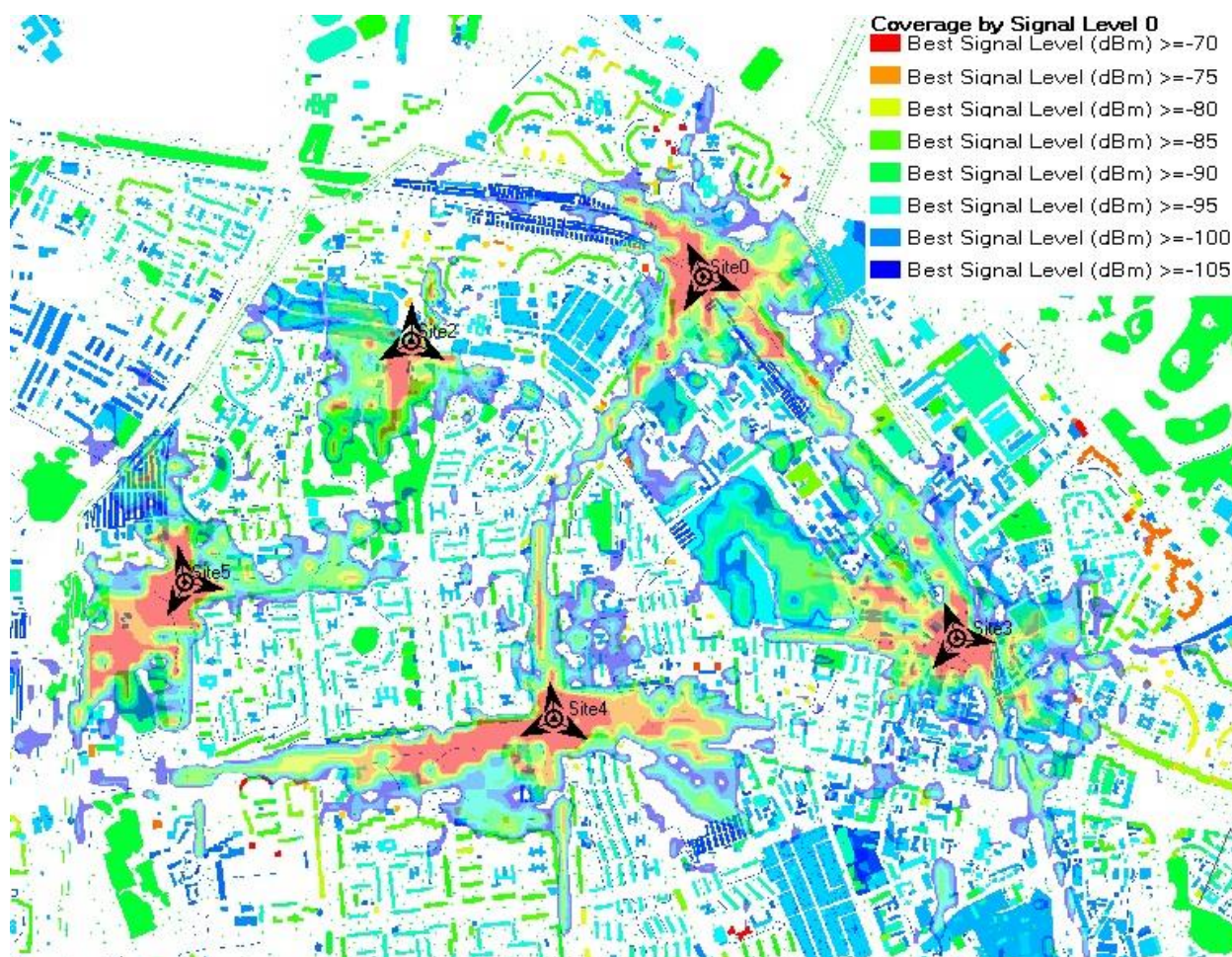
1x3x3

4. Расчет зоны покрытия по уровню принимаемого сигнала

После того, как требования к функционированию сети сформулированы, выбраны кластерная структура и первоначальный частотный план, происходит проверка возможности размещения сайтов на выбранных местах. Далее с использованием специализированного программного обеспечения выполняется расчет зоны радиопокрытия для направления передачи вниз (downlink) и вверх (uplink) отдельно.

В качестве инструмента прогнозирования потерь распространения радиоволн можно использовать различные статистические и квазидетерминистские математические модели распространения радиоволн. Среди них: ITU-R P.1546, P.1812, P.526, Cost Hata, Lonley-Rice, SUI, SPM и WLL. Однозначных указаний на использование той или иной математической модели не существует и мы можем по своему усмотрению выбрать математическую модель распространения радиоволн (PPB). Однако как показывают наши

исследования, наибольшее приближение результатов прогнозирования и измерений в застройке города Минска наблюдается при использовании дифракционных моделей P.526, SPM и WLL. Ниже приведен пример расчета зон радиопокрытия сети широкополосного беспроводного доступа на территории города Минска с использованием дифракционной математической модели распространения радиоволн SPM.



5. Расчет внутрисистемных интерференций

После расчета зоны покрытия по уровням принимаемого сигнала мы проводим анализ внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС) для принятой структуры сети.

Провести анализ внутрисистемной электромагнитной совместимости сети ШБД можно двумя способами:

- рассчитать с использованием модели МСЭ-R P.452 зоны помех от базовых станций абонентским станциям, базовым станциям на которых назначены те

же рабочие частоты; провести те же вычисления, только за источник помех принять абонентские станции, а за рецептор помех – базовые станции;

- рассчитать с использованием специализированного программного обеспечения зоны покрытия по уровням $C/(I+N)$ - "сигнал/помеха" для направлений передачи downlink и uplink. Подобный расчет в качестве примера приведен ниже.



6. Планирование зон хэндовера

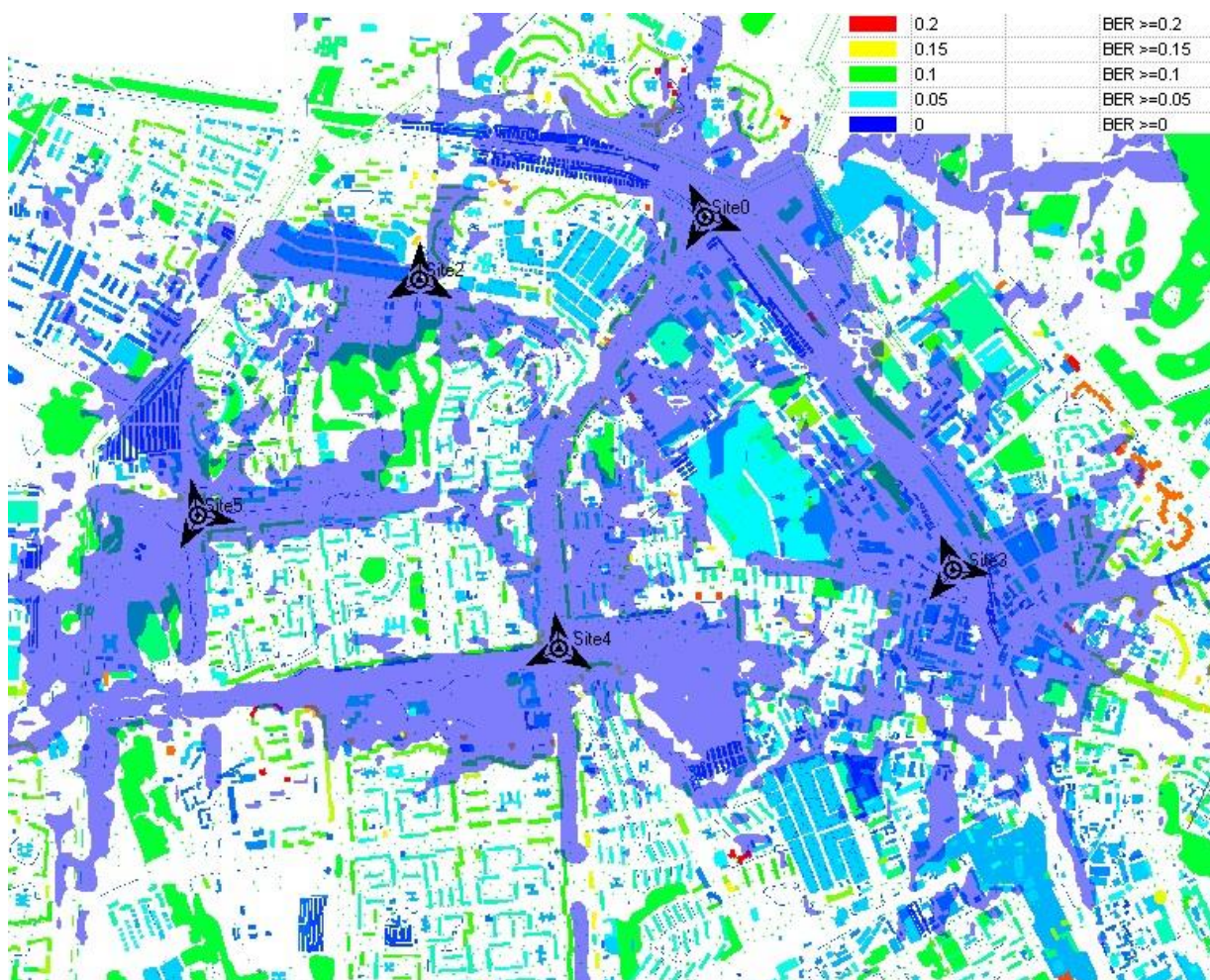
Работа мобильной широкополосной сети при перемещении абонентов из зоны покрытия одной базовой станции в другую обязательно предусматривает выполнение процедуры хэндовера. Возможны два варианта технической реализации хэндовера в оборудовании: мягкий и жесткий. Мягкий хэндовер представляет собой переключение абонентской станции с одной базовой станции на другую, причем разрыв соединения с первой базовой станцией происходит после установления связи абонентской станцией со второй базовой станцией. Жесткий хэндовер характеризуется потерей соединения абонентской станции и первой базовой станции, после чего устанавливается соединение абонентской станции со второй базовой станцией.

Для четкой отработки процедуры хэндовера необходимо выполнить планирование зон хэндовера между зонами покрытия соседних секторов (сайтов). Планирование в данном случае заключается в уменьшении излишнего перекрытия соседних зон покрытия при сохранении формы зоны радиопокрытия отдельных секторов.

7. Расчет качественных показателей покрытия сетей подвижной радиосвязи

На заключительном этапе планирования сети подвижной радиосвязи производится расчет ее качественных параметров функционирования и представляется в виде карты покрытия, наложенной на зону обслуживания по выбранному критерию.

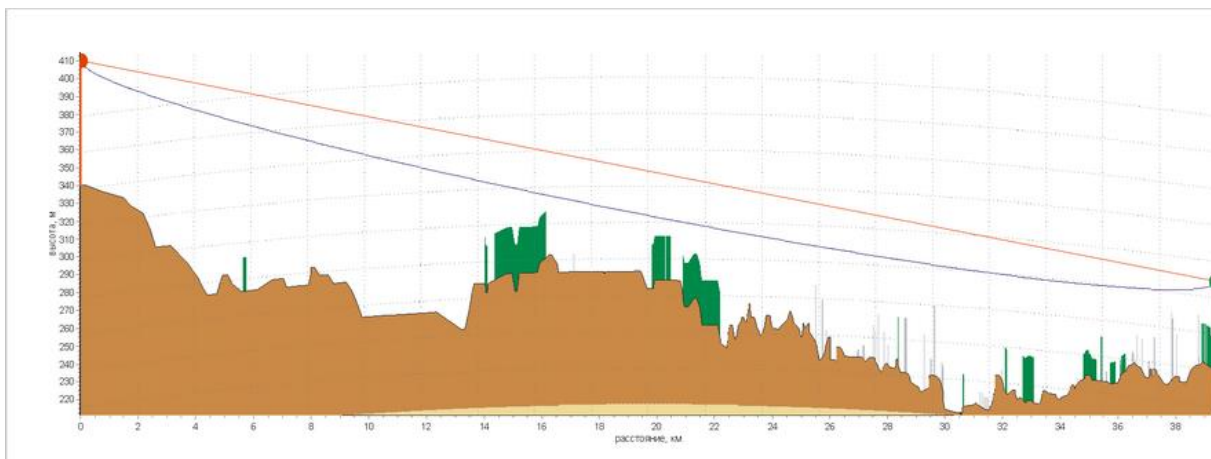
К основным показателям качества работы мобильной беспроводной сети относятся: скорость передачи данных и коэффициент битовой ошибки (каждый из параметров рассчитывается отдельно для направлений downlink и uplink) .



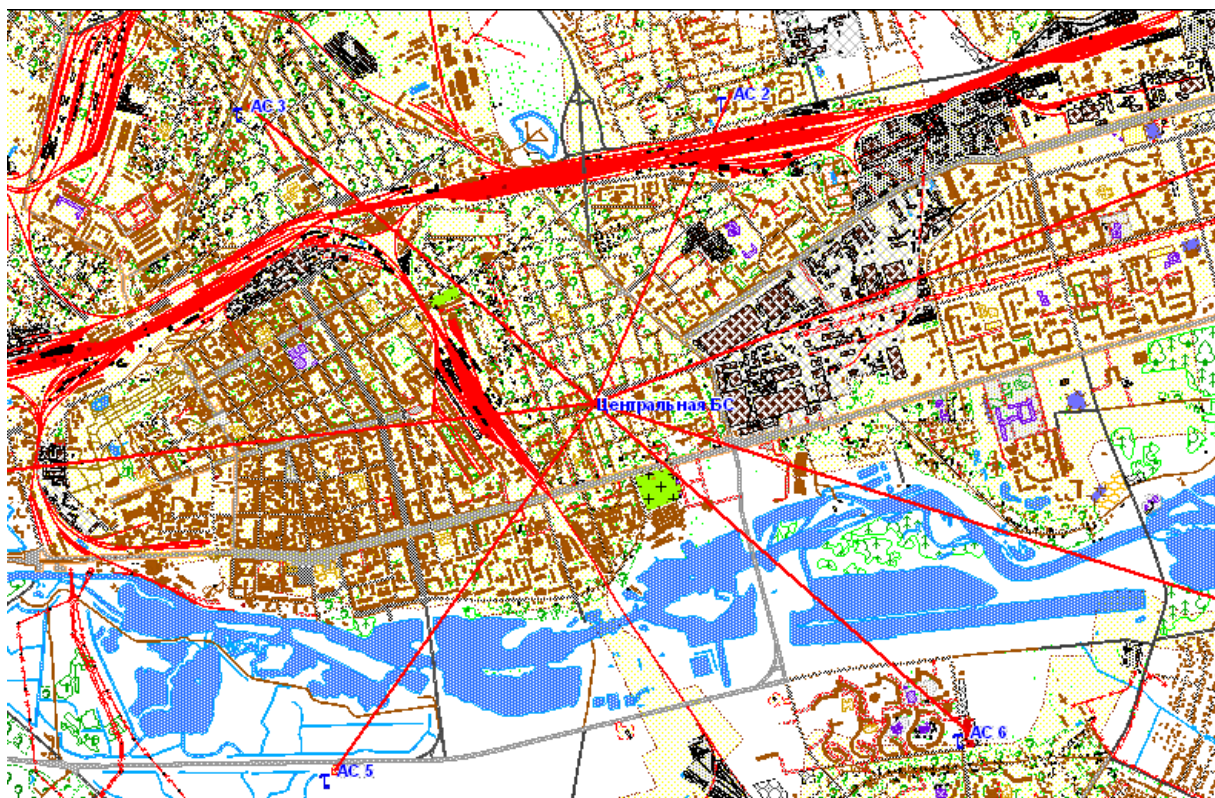
Фиксированная радиосвязь

Расчет радиорелейных линий в режиме «точка - точка» в диапазоне частот 100 МГц – 100 ГГц с учетом географических и климатических факторов по показателям качества и готовности.

- Расчет линий и сетей фиксированного беспроводного доступа (ФБД) в режимах «точка - точка» и «точка - многоточка» для частотного и временного дуплекса в любых частотных диапазонах.
- Построение и анализ профиля местности для городских и загородных условий на основе ЦКМ векторных и растровых форматов, топографических карт и спутниковых снимков Земли.
- Рекомендации по высотам антенных опор и оборудованию.



Радиорелейные линии (РРЛ)



Фиксированный беспроводный доступ (ФБД)

Производится расчет как линий прямой видимости (открытых), так и линий с дифракционными потерями (полуоткрытых и закрытых). Учитываются условия возникновения замираний (гладких и частотно-селективных) вследствие многолучевого распространения радиоволн и субрефракции, поглощения и рассеяния в осадках. Учет частотно-селективных замираний (на основе метода сигнатуры) позволяет производить расчеты для линий со скоростями до 155 Мбит/с.

Расчет потерь на полуоткрытых и закрытых трассах может осуществляться как в автоматическом режиме, так и в режиме ручной настройки модели рельефа. Для линий прямой видимости в ручном режиме предусмотрен детальный анализ условий возникновения отражений от подстилающей поверхности с учетом ее проводимости, диэлектрической проницаемости, неровности и пространственного положения участка отражения. Возможен как ручной ввод, так и автоматическое определение проводимости и диэлектрической проницаемости по типу подстилающей поверхности, а также географических и климатических параметров для заданных координат мест размещения станций (используются встроенные цифровые карты БР МСЭ-R).

Расчет может осуществляться с использованием нескольких вариантов ввода данных по рельефу:

- импорт профиля с цифровых карт стандарта SRTM;
- импорт профиля, полученного в других ГИС;
- построение профиля с использованием встроенной электронной линейки, позволяющей вводить данные по рельефу (отсчетов расстояний и высот, а также растительности, местных предметов и водной поверхности) с отсканированных листов обычных топографических карт, отсчет расстояний при этом выполняется автоматически;
- ручной ввод в табличном виде.

Проведение расчетов обеспечивается для любой конфигурации современного радиорелейного оборудования, включая поддержку расчетов для случаев:

- пространственного разнесения,
- частотного разнесения,
- пространственно-частотного и углового разнесения,
- а также передачи на ортогональной поляризации.

Расчет проводится в соответствии с рекомендациями Бюро Радиосвязи МСЭ-R: P.530, P.527, P.526, P.841, P.310, P.453, P.525, P.836, P.1510, P.676, P-838, F.752, F-1093.

Основные результаты расчета:

- показатель качества по ошибкам в периоды готовности линии (SESR,%) и его составляющие (гладкие и частотно-селективные замирания) для углового, пространственного, частотного и пространственно-частотного разнесения;
- показатель неготовности (Кнг, %);
- медианный уровень высокочастотного сигнала на входе приемника;
- запас уровня высокочастотного сигнала на входе приемника;
- постоянные составляющие потерь на трассе и др.

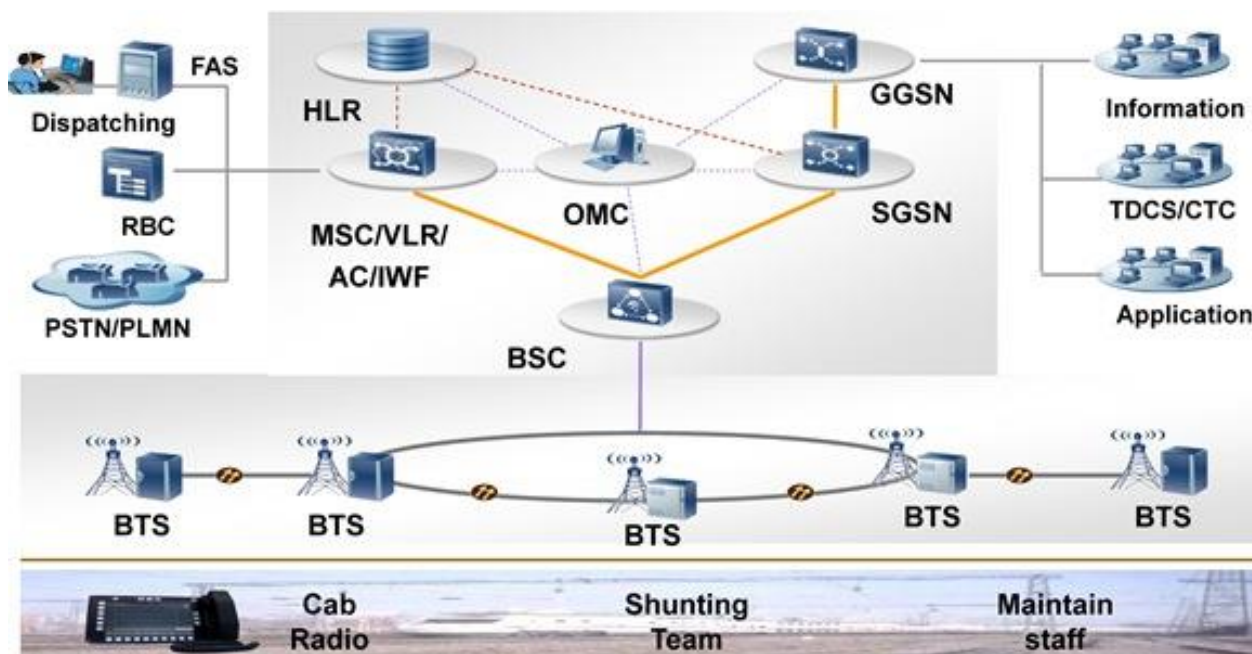
GSM-R

GSM-R – это современный международный стандарт профессиональной связи для железной дороги. В рамках данного стандарта предусмотрено использование единых полос частот для разных стран. Сеть GSM-R представляет комплексные решения для выполнения функций голосовой связи, автоматизации движения поездов, передачи служебной информации и обеспечения безопасности движения. Таким образом, внедрение сети данного стандарта интегрирует систему железнодорожной связи страны в единую мировую систему связи, что особенно важно при международном сообщении. Качественная голосовая связь повысит эффективность работы персонала, уменьшит текущие расходы на эксплуатацию несовместимого оборудования связи. Автоматизация движения поездов повысит пропускную способность железной дороги и эффективность использования железнодорожных путей. В целом же внедрение системы повысит безопасность и эффективность железнодорожного сообщения, уменьшит количество аварийных ситуаций и увеличит доходы. GSM-R обладает существенными преимуществами по сравнению с аналоговыми системами связи и стандартом TETRA, поскольку

разрабатывался специально как единый стандарт связи для железных дорог и учитывает все особенности и требования связи для железнодорожных дорог.



Первоочередным видом связи в сети стандарта GSM-R является связь с машинистом поезда. Для организации данного вида связи на крыше локомотива устанавливается антенна, а в кабине машиниста устанавливается локомотивный терминал. В качестве персонального средства связи для работников железных дорог выступает мобильный телефонный аппарат GSM-R. Решения GSM-R включает в себя оборудование опорной сети коммутации каналов (коммутатор с распределенной структурой для обслуживания голосовых вызовов) и коммутации пакетов (коммутатор и шлюз для предоставления сервиса GPRS), оборудование сети радио доступа (контроллер базовых станций и базовые станции), терминальное оборудование (мобильные телефоны стандарта GSM-R) и подсистему управления. Ниже приведена архитектура сети GSM-R.



За основу стандарта GSM-R взят стандарт подвижной радиосвязи общего пользования GSM, дополненный функциями для железных дорог в соответствии со спецификациями проекта EIRENE (European Integrated Railway Radio Enhanced Network):

- передача сигнализации ETCS (European Train Control System);
- голосовая радиосвязь и передача данных в условиях движения со скоростями до 450 км/ч;
- наличие функции группового вызова;
- управление приоритетами вызовов и механизм срочного вызова;
- наличие функциональной адресации в зависимости от местоположения абонента;
- использование специально выделенных полос радиочастот.

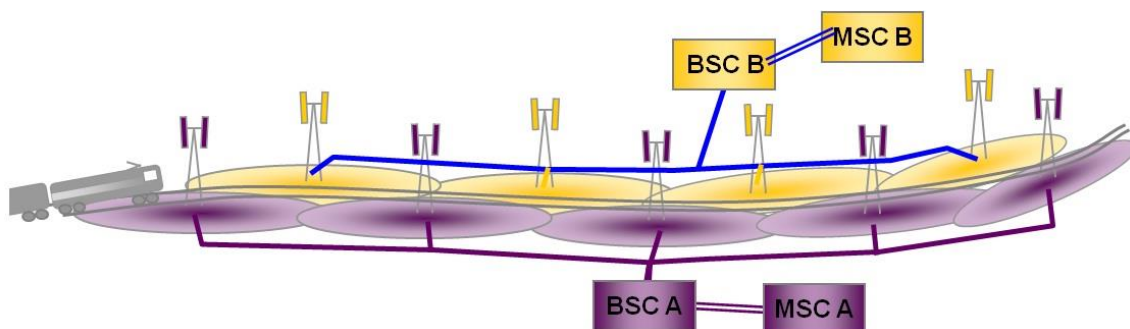
Широкие функциональные возможности GSM-R и высокие скорости движения поездов накладывают жесткие требования к качеству покрытия, ЭМС, времени хэндовера и другим техническим параметрам. Так, согласно EIRENE, на входе локомотивного приемника рекомендуется с вероятностью 95% обеспечить уровень мощности сигнала не менее -92 дБм на линиях с

ETCS 2/3 уровня при скорости движения поезда до 280 км/ч. Вероятность блокировки вызовов согласно EIRENE должна быть не более 0.5%. Процедуры хэндовера должны выполняться с вероятностью не менее 99.5%

На этапе проектирования сетей GSM-R мы решаем следующие задачи:

- обследование и выбор мест для размещения сайтов сети GSM-R;
- расчет зон обслуживания для локомотивных и мобильных станций;
- расчет распределения абонентской нагрузки на железнодорожных перегонах по проектируемым сайтам;
- расчет внутрисистемных помех и разработка частотно-территориального плана.

Для удовлетворения высоких требований по надежности связи на ж/д, выбор мест установки базовых станций производился с 50%-м перекрытием зон покрытия соседних сайтов. В результате вся зона обслуживания проектируемой сети фактически имеет двойное покрытие. Схематическое изображение данной топологии сети приведено на следующем рисунке.



Специалистами ОАО "Гипросвязь" проводилась работа по разработке частотно-территориального плана и проекта по электромагнитной совместимости сети GSM-R для Белорусской железной дороги на участке "Минск-Молодечно-Гудогай".

Решение подобных задач, учитывая жесткие требования заказчика по надежности, резервированию и двойному покрытию зон обслуживания, проводилось впервые в Республике Беларусь. В ходе выполнения частотно-территориального планирования в г. Минске, как наиболее сложном участке

сети, нами были разработаны уникальные принципы планирования с учетом выполнения жестких условий ЭМС, которые в дальнейшем могут быть применены при проектировании сетей GSM-R на других участках железной дороги, включая сложные транспортные развязки.

WI-FI "под ключ"

ОАО "Гипросвязь" предоставляет услуги по полному циклу проектирования сетей радиодоступа стандарта Wi-Fi. Нашими специалистами разработана методика проектирования и оптимизации сетей Wi-Fi. Опытные специалисты, отличное измерительное оборудование и программное обеспечение позволяют проектировать сети Wi-Fi "под ключ" любой сложности и назначения на высоком уровне.

Наши специалисты помогут вам:

- сформировать технические требования;
- выбрать оборудование Wi-Fi;
- выполнить предпроектное обследование (измерение уровня интерференций и предварительной зоны радиопокрытия);
- провести проектирование сети;
- выполнить монтажные и пусконаладочные работы;
- выполнить контрольные измерения зоны радиопокрытия;
- оформить регистрацию сети в государственной инспекции по электросвязи.

При проектировании сетей Wi-Fi нами решаются следующие основные задачи:

1. Формирование технических требований:

- для абонентских устройств (количество беспроводных абонентов, плотность их размещения, интенсивность трафика, тип трафика);
- по типу установки сети (планировка помещений, тип строительных материалов, места подключения);

- по требованиям безопасности;
- по топологии сети (централизованная/децентрализованная);
- особенности частотного планирования (ограничения, накладываемые характеристиками оборудования, учет других РЭС, совместно использующих полосу радиочастот, а также ограничений, накладываемых радиочастотными органами).

2. Выбор оборудования.

На основании сформированных в п.1 требований производится подбор оборудования в соответствии с необходимостью обеспечения определенных услуг:

- обеспечение стандартной пропускной способности (54 Мбит/с на точку доступа) с качеством коллизионного доступа абонентов к среде передачи
- традиционное оборудование Wi-Fi стандартов IEEE 802.11 b/g;
- обеспечение максимально возможной в локальных беспроводных сетях пропускной способности (до 600 Мбит/с на точку доступа) за счет использования расширенных до 40 МГц радиочастотных каналов и технологии сложных антенных систем MIMO – оборудование стандарта IEEE 802.11n;
- обеспечение требуемого качества предоставляемых услуг – оборудование стандарта IEEE 802.11e;
- создание самоконфигурирующейся ячеистой сети в соответствии с технологией MESH – оборудование стандарта IEEE 802.11s;
- создание универсальной и совместимой системы роуминга для предоставления мобильному пользователю возможности перехода из зоны обслуживания одной сети в другую – оборудование стандарта IEEE 802.11r.

3. Эскизное проектирование. Формирование первоначальной структуры сети и первоначального плана размещения сетевого оборудования.

4. Предпроектное обследование (измерение зоны радиопокрытия) для беспроводных сетей, работающих внутри помещений:

- подтверждение и уточнение мест установки точек доступа с учетом размещения различных радиоотражающих и радиопоглощающих материалов в зоне покрытия сети;
- уточнение спецификации оборудования (количество точек доступа, тип антенн, кабеля и т.п.);
- определение оптимального радиорежима между сегментами сети (радиочастотные каналы, уровни мощности, плоскости поляризации и т.д.).

5. Предпроектное моделирование зоны радиопокрытия для беспроводных сетей, работающих вне помещений. С использованием существующих математических моделей распространения радиоволн производится расчет зон покрытия точек доступа. При расчете зоны покрытия для широкополосных сетей, работающих вне помещений, следует учитывать, что наибольшее влияние в составляющую потерь вносят эффекты отражения от стен зданий, дифракции на ребрах зданий и проникновения в здания, а также рассеивания и поглощения в растительности. Рельеф земной поверхности допустимо не учитывать в расчетах.

6. Рабочее проектирование (план размещения сетевого оборудования, результаты частотного планирования и измерения/моделирования зон покрытия сети, монтажная документация и др.)

7. Монтажные и пусконаладочные работы.

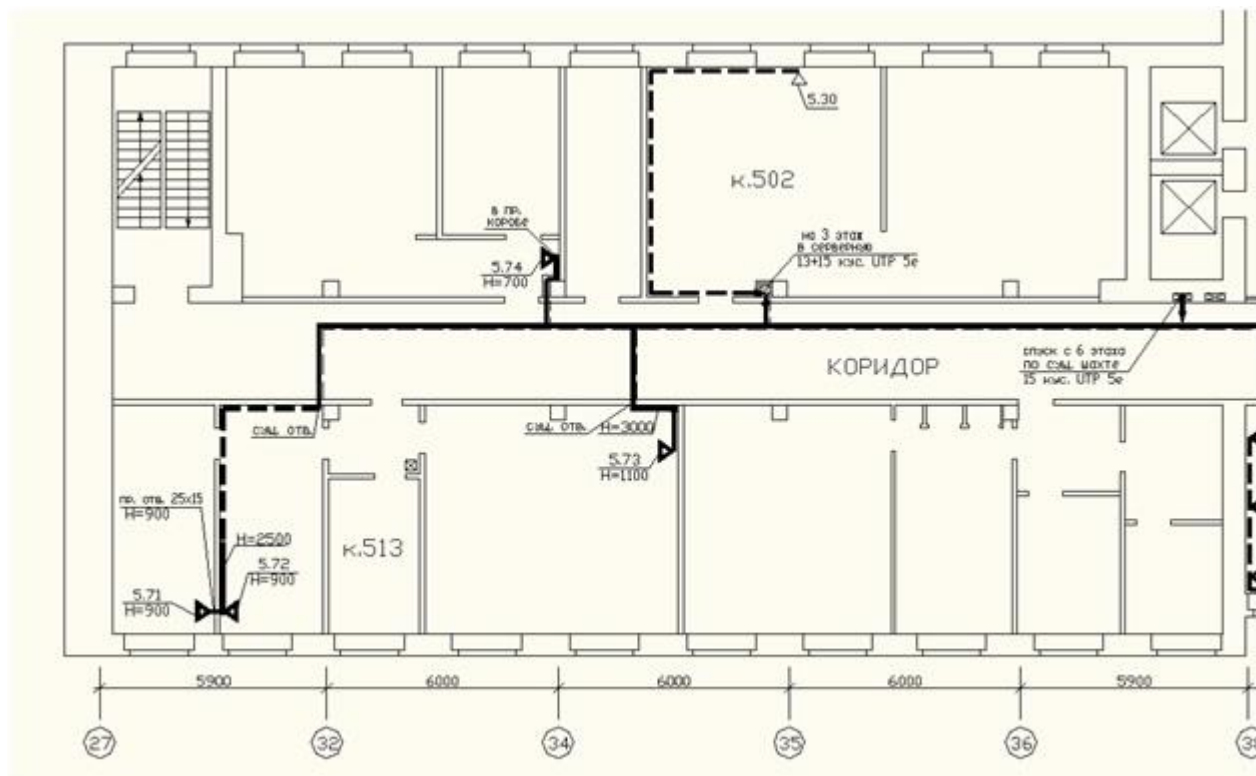
8. Контрольное измерение зоны радиопокрытия.

9. Регистрация сети в государственной инспекции по электросвязи. При необходимости - согласование с Министерством обороны Республики Беларусь.

10. Ввод беспроводной сети в эксплуатацию.

С целью обеспечения качественного радиопокрытия и оптимизации мест установки точек доступа мы выполняем экспериментальное измерение зон покрытия внутри помещений, включающее следующие процедуры:

1. Создание цифрового плана помещения. На первом этапе подготовки исходных данных необходимо создать цифровой план проектируемого объекта с использованием различных графических или конструкторских пакетов, где затем предполагается размещение точек доступа сети Wi-Fi.



Пример этажа здания офисного типа

2. Размещение точек доступа на проектируемом объекте. На данном этапе производится первичное размещение точек доступа Wi-Fi на всей территории проектируемого объекта с учетом площадей отдельных офисов (общая рекомендация – средний радиус покрытия точки доступа 35 метров), материалов стен (средние потери проникновения радиоволн сквозь кирпичную стену – 8 дБ, железобетонную – 12 дБ), типы офисных дверей (средние потери проникновения радиоволн сквозь тяжелую металлическую дверь – 15 дБ, деревянную – 11 дБ), а также прочие предметы, находящиеся

внутри офисов, способные вносить потери на пути распространения радиоволн.

3. Назначение радиочастотных каналов. Частотное планирование точек доступа производится в соответствии с рисунком 4, а также с учетом уровня шумов от других РЭС, совместно использующую данную полосу. Общая рекомендация – назначение рабочих частотных номиналов соседним точкам доступа производится через 5 каналов (вследствие фактической ширины занимаемой спектра 20 МГц). Можно использовать готовые шаблоны, приведенные на рисунке ниже, либо в каждом конкретном случае разработать свой частотный план, не нарушая при этом общей рекомендации.



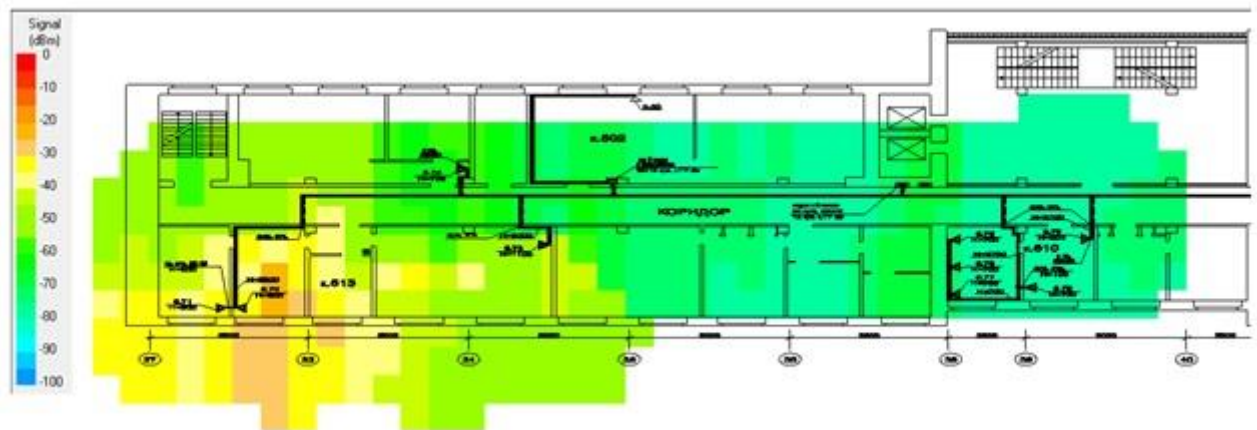
Возможные частотные планы сетей Wi-Fi в полосе 2,4-2,4835 ГГц

4. Измерение уровней сигналов и шумов с отображением на плане этажа. С использованием различных существующих аппаратно-программных комплексов предназначенных для экспериментального планирования сетей Wi-Fi на план проектируемого объекта наносятся уровни сигналов принимаемых терминальными устройствами от точек доступа, а также контролируются при этом уровни шумов в канале.

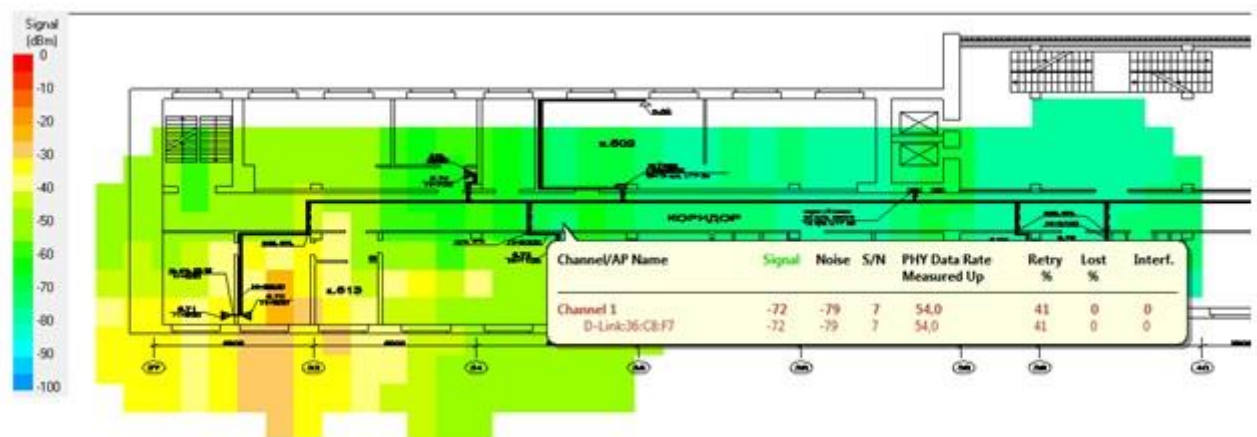
На рисунках ниже приведены результаты экспериментальных измерений зоны покрытия беспроводной сети Wi-Fi для одного офиса с отображением уровней принимаемого сигнала. и зона покрытия того же офиса с дополнительно указанными параметрами качества функционирования сети:

- отношение сигнал/шум на входе приемника, дБ;

- скорость передачи данных на физическом уровне, Мбит/с;
- процент повторных запросов на передачу пакетов, %;
- процент потерянных пакетов, %.



Результаты экспериментальных измерений зоны покрытия беспроводной сети



Результаты экспериментальных измерений зоны покрытия беспроводной сети с детализацией параметров качества в выбранной области

Если в результате проведенных измерений отсутствуют зоны с высокими уровнями шумов на выбранных каналах и результирующее покрытие удовлетворяет техническим требованиям на проектирование, выбранный частотно-территориальный план принимается. В противном случае итерационно выполняется изменение первоначального частотного плана и/или мест размещения точек доступа с последующим измерением зоны покрытия и контролем уровней шумов пока фактические экспериментальные результаты

не станут удовлетворять требованиям технического задания на проектирование беспроводной сети.