

Министерство образования и науки Украины
Севастопольский национальный технический университет

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению контрольной работы по дисциплине
«Электромагнитная совместимость РЭА»
для студентов заочной формы обучения
направления 6.050901 — «Радиотехника».

Севастополь
2009

УДК 621.396.1

Методические указания к выполнению контрольной работы по дисциплине «Электромагнитная совместимость РЭА» для студентов заочной формы обучения направления 6.050901 — «Радиотехника» / Сост. Л.В.Денисов. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. — 34 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам заочной формы обучения в освоении основных теоретических разделов и выполнении контрольной работы по дисциплине «Электромагнитная совместимость РЭА».

Методические указания от 2007 г. рассмотрены и утверждены на заседании кафедры радиотехники (протокол № 11 от 21 мая 2007 г.)

Рецензент: Зиборов С.Р., канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники

Ответственный за выпуск: Гимпилевич Ю.Б., доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники

Допущено учебно-методическим центром СевНТУ в качестве методических указаний

СОДЕРЖАНИЕ

Принятые сокращения	4
1. Цель контрольной работы	5
2. Краткие теоретические сведения	5
2.1. Электромагнитная совместимость радиорелейной линии	5
2.2. Формирование группового сигнала радиорелейной линии	8
2.3. Пик-фактор группового сигнала	10
2.4. Шумы на выходе телефонного канала РРЛ с частотным разделением каналов	12
2.5. Применение фазовых корректоров	13
3. Правила оформления контрольной работы	15
4. Задание по контрольной работе	16
4.1. Задача №1	16
4.2. Задача №2	19
5. Указания по выполнению контрольной работы	20
5.1. Методика решения задачи №1	20
5.2. Методика решения задачи №2	27
Библиографический список	29
Приложение А	30
Приложение Б	33
Приложение В	34

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
ВГ — вторичная группа телефонных каналов
ВЧ — высокочастотный
ГВЗ — групповое время запаздывания
МККР — Международный консультативный комитет по радио¹
МККТТ — Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии²
МТС — междугородная телефонная станция
ПГ — первичная группа телефонных каналов
Пд — передатчик (радиопередатчик)
Пр — приемник (радиоприемник)
РРЛ — радиорелейная линия
РЭА — радиоэлектронная аппаратура
СВЧ — сверхвысокочастотный
ТГ — третичная группа телефонных каналов
ФЧХ — фазочастотная характеристика
ЧГ — четверичная группа телефонных каналов
ЧД — частотный демодулятор
ЧМ — частотный модулятор

¹ Современное русскоязычное сокращение: МСЭ-Р (сектор радиосвязи Международного Союза Электросвязи), международное сокращение: ITU-R (International Telecommunication Union - Radio).

² Современное русскоязычное сокращение: МСЭ-Т (сектор стандартизации электросвязи Международного Союза Электросвязи); международное сокращение: ITU-T (International Telecommunication Union – T (telegraphy, telephony)).

1. ЦЕЛЬ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Целью контрольной работы является развитие навыков анализа и расчета характеристик электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, а также приобретение умения оформлять научно-техническую документацию с учетом требований действующих стандартов.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Электромагнитная совместимость радиорелейной линии

Характерной особенностью современных радиорелейных линий (РРЛ) является освоение сверхвысоких частот (СВЧ) от 2 до 38 ГГц. Подобные радиосистемы называют микроволновыми. Кроме РРЛ к ним относятся: телеметрические системы сбора и распределения информации, сотовые системы телефонной связи и т. п.

Микроволновые радиосистемы обеспечивает передачу больших объемов информации на расстоянии прямой видимости. Электромагнитные волны нижней части указанного выше СВЧ диапазона проходят через атмосферу с меньшим затуханием и позволяют на частоте 2 ГГц получить дальность связи до 90 км. Так как с повышением частоты электромагнитные волны сильнее затухают в атмосфере, то и при той же мощности передатчика на частоте 38 ГГц обеспечивается дальность связи не более 5...8 км.

Для увеличения дальности связи в указанном диапазоне частот используют РРЛ, принцип работы которых основан на ретрансляции сигнала.

Совокупность оборудования, которая образует высокочастотный тракт РРЛ, работающий на несущей частоте, принято называть высокочастотным стволом, радиостволом или просто стволом. Используя несколько стволов, работающих на различных несущих частотах, можно увеличить пропускную способность РРЛ.

Рассмотрим работу одного ствола РРЛ, структурная схема которого изображена на рис. 2.1 [1, 2].

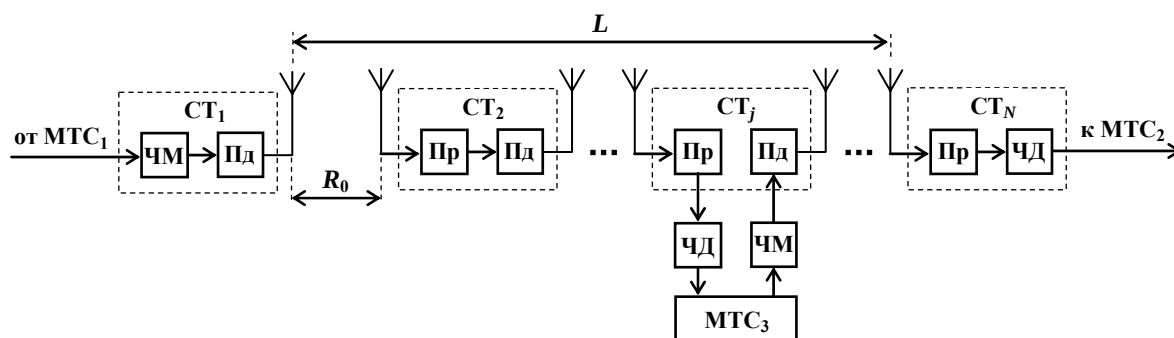


Рис. 2.1 — Структурная схема одного ствола микроволновой РРЛ

Радиорелейная линия состоит из N радиостанций: $СТ_1, СТ_2, СТ_j, \dots, СТ_N$. Расстояние R_0 между соседними станциями называют **пролетом** или **интервалом** линии. Приемники, передатчики и антенно-фидерные устройства составляют основу **высокочастотного тракта** РРЛ, а модуляторы и демодуляторы являются

элементами так называемых **групповых трактов**³. Это означает, что модуляторы и демодуляторы имеют дело не с одиночным низкочастотным сигналом, приходящим от одного телефонного абонента, а с **групповым сигналом**, составленным из множества одиночных низкочастотных сигналов (см. раздел 2.2. Формирование группового сигнала радиорелейной линии).

Групповой сигнал от междугородной телефонной станции МТС₁ поступает на частотный модулятор ЧМ оконечной станции СТ₁, где он модулирует колебания промежуточной частоты 70 или 140 МГц. Полученный частотно-модулированный сигнал промежуточной частоты поступает на передатчик Пд, который преобразует его в частотно-модулированный СВЧ сигнал и усиливает его по мощности. Усиленный СВЧ сигнал поступает в антенну и излучается в направлении ближайшей **промежуточной станции** СТ₂, которая удалена от передатчика оконечной станции на расстояние прямой видимости. При высоте подвеса антенн 40...60 м расстоянии прямой видимости составляет $R_0 = 40...60$ км в среднeperесечённой местности.

Промежуточная станция СТ₂ принимает СВЧ радиосигнал, усиливает его и передает дальше в направлении следующей промежуточной станции. Такой процесс приема и передачи сигналов называют **ретрансляцией**.

Разновидностью промежуточной станции является **узловая станция** СТ_j, которая позволяет выводить из группового сигнала, сформированного на МТС₁, необходимые его частные составляющие и подавать их (в виде другого группового сигнала) на вход МТС₃ (для дальнейшего преобразования в совокупность низкочастотных телефонных сигналов и распределения их по адресам соответствующих абонентов). Узловая станция СТ_j так же позволяет сформировать новый групповой сигнал путём добавления новых частных составляющих, образованных из низкочастотных телефонных сигналов абонентов МТС₃. Такая операция преобразования одного группового сигнала, сформированного на МТС₁, в другой групповой сигнал (не содержащий частные составляющие, выведенные на вход МТС₃, и содержащий добавленные с выхода МТС₃ новые частные составляющие) называется **переприёмом по групповому спектру**.

Пройдя последовательную цепь промежуточных станций, СВЧ сигнал улавливается антенной оконечной станции СТ_N. Приемник Пр этой станции преобразует СВЧ сигнал в сигнал промежуточной частоты, после чего он демодулируется частотным демодулятором ЧД и по соединительной линии поступает на МТС₂.

Используя описанный принцип ретрансляции сигналов, строят РРЛ связи протяженностью несколько тысяч километров. При этом под **телефонным каналом РРЛ** понимают всю цепочку технических средств, обеспечивающих доставку одиночного низкочастотного телефонного сигнала с входа аппаратуры уплотне-

³ Групповым трактом называют тракт, образованный совокупностью оборудования от выхода демодулятора до входа модулятора, включая предыскажающий и восстанавливающие контуры. О назначении этих контуров см. Приложение Б.

ния одной МТС на выход аналогичной аппаратуры уплотнения другой МТС⁴.

В телефонном канале к полезному низкочастотному сигналу добавляются различные шумы, обусловленные неидеальностью технических средств, осуществляющих необходимые преобразования полезного сигнала.

Для оценки качества телефонного канала определяют уровни мощности полезного сигнала и совокупного шума (далее по тексту — «шума») на его выходе.

Уровни мощности сигнала и шума принято различать на **абсолютные** и **относительные** уровни. Обычно относительный уровень мощности сигнала или шума рассчитывают в децибелах относительно мощности 1 мВт по формуле

$$P_{\text{дБм}} = 10 \lg P,$$

где P — мощность сигнала или шума, выраженная в милливаттах.

Точка канала, в которой мощность полезного сигнала равна мощности на входе канала, называется **точкой нулевого относительного уровня**. Принято, что при этом мощность полезного сигнала на входе канала равна 1 мВт. Тогда относительный уровень мощности полезного сигнала в точке нулевого относительного уровня составляет 1 мВт. Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии приводит нормы на качество каналов для точки нулевого относительного уровня (см. Приложение В). Будем считать, что выход телефонного канала содержит точку нулевого относительного уровня.

При одновременной работе большого числа различных радиотехнических устройств имеет место взаимное влияние одних устройств на другие. Например, приемники станций одной РРЛ могут принимать сигналы других РРЛ, а также радиотехнических средств, работающих в том же диапазоне частот, что и данная РРЛ. При этом любые сигналы, искажающие полезный сигнал РРЛ, рассматривают как **помехи**. Результатом их действия является появление дополнительного шума на выходе телефонного канала. Для обеспечения **электромагнитной совместимости** (ЭМС) РРЛ необходимо учитывать возможность появления этого дополнительного шума таким образом, чтобы качество телефонных каналов оставалось в пределах норм (см. Приложение В). В этом случае говорят об обеспечении ЭМС РРЛ и других радиотехнических систем, под которой понимают способность их одновременного функционирования при допустимом ухудшении их технических характеристик [1...6, 8...13].

При прохождении смеси сигнала и помехи через высокочастотные технические средства РРЛ отношение сигнал-помеха на выходе телефонного канала, как правило, отличается от отношения сигнал-помеха на высокочастотном входе приемника.

Если помеха не является гауссовым шумом, то для оценки воздействия помехи применяют коэффициент ослабления помехи $K_{\text{оп}}$, который показывает, во сколько раз отношение сигнал-помеха на выходе телефонного канала становится больше по сравнению с отношением сигнал-помеха на входе приемника.

⁴ Под телефонным каналом будем так же понимать ту часть спектра группового сигнала, из которой путём соответствующих преобразований можно выделить информацию, содержащуюся в исходном телефонном сообщении абонента.

2.2. Формирование группового сигнала радиорелейной линии

В многоканальных связных радиосистемах с частотным разделением каналов, в частности, в радиорелейных линиях вместо термина «частотное разделение каналов» применяют термин «частотное уплотнение каналов» или просто «частотное уплотнение». Для частотного уплотнения используют типовую преобразовательную аппаратуру, которую называют так же **аппаратурой уплотнения** или **группообразующей аппаратурой**. Аппаратура уплотнения обычно располагается на МТС.

При частотном уплотнении каналов спектр одиночного телефонного сообщения ограничивают полосой частот от 300 до 3400 Гц, а затем путём многократного преобразования частоты переносят в область высоких частот, образуя первичную (ПГ), вторичную (ВГ), третичную (ТГ) и четвертичную (ЧГ) группы каналов. Сформированный таким образом групповой сигнал подаётся на вход модулятора радиопередатчика. В зависимости от общего числа каналов в системе передачи групповой сигнал может состоять только из первичных групп, первичных и вторичных групп и т.д. в любой комбинации.

Принцип формирования групп телефонных каналов при частотном уплотнении показан на рис. 2.2...2.5.

Первичная группа состоит из 12-ти телефонных каналов и занимает полосу частот 48 кГц от 60 до 108 кГц. На рис. 2.2 показан спектр $S_{\Pi}(f)$ первичной группы каналов. Каждому телефонному каналу (ТК) первичной группы отводится полоса частот 4 кГц, в которой 3,1 кГц занимает спектр телефонного сигнала и 0,9 кГц — защитный интервал частот между каналами.

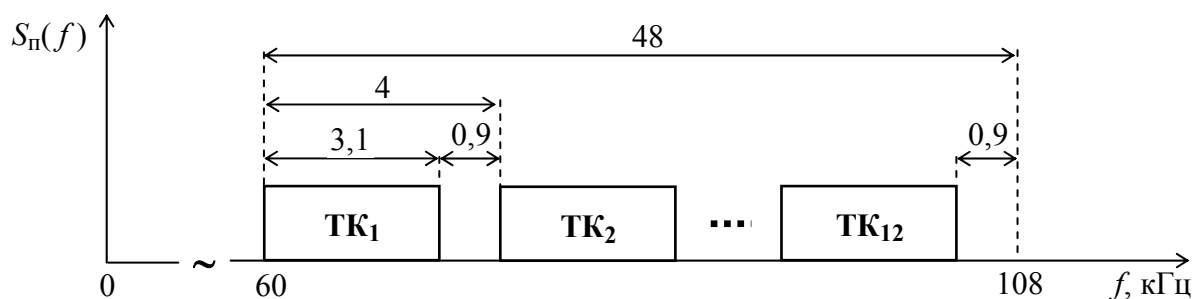


Рис. 2.2 — Спектр первичной группы телефонных каналов (12 каналов)

Вторичная группа образуется путём преобразования частоты 5 первичных групп и содержит $5 \times 12 = 60$ телефонных каналов. Спектр $S_{\text{В}}(f)$ вторичной группы каналов показан на рис. 2.3. Защитный интервал частот между первичными группами внутри вторичной группы не предусматривается. Вторичная группа занимает полосу частот 240 кГц от 312 до 552 кГц.

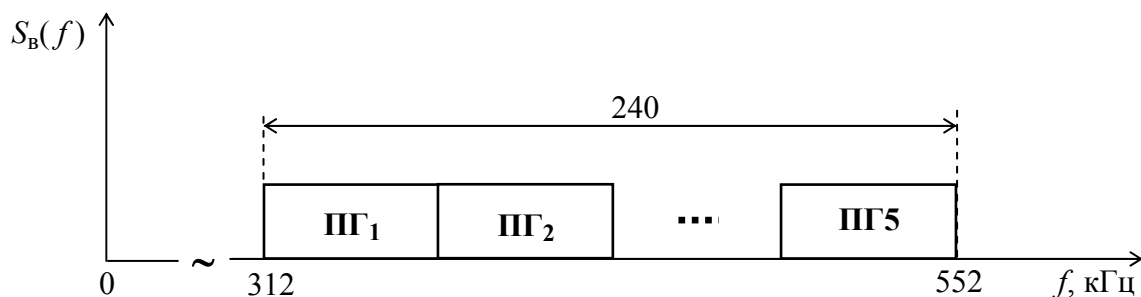


Рис. 2.3 — Спектр вторичной группы телефонных каналов (5 по 12 = 60 каналов)

Третичная группа состоит из 5 вторичных групп, разнесенных между собой на защитный интервал частот 8 кГц и содержит $5 \times 60 = 300$ каналов. Спектр $S_T(f)$ вторичной группы каналов показан на рис. 2.4. Третичная группа занимает полосу частот 1232 кГц от 812 до 2044 кГц.

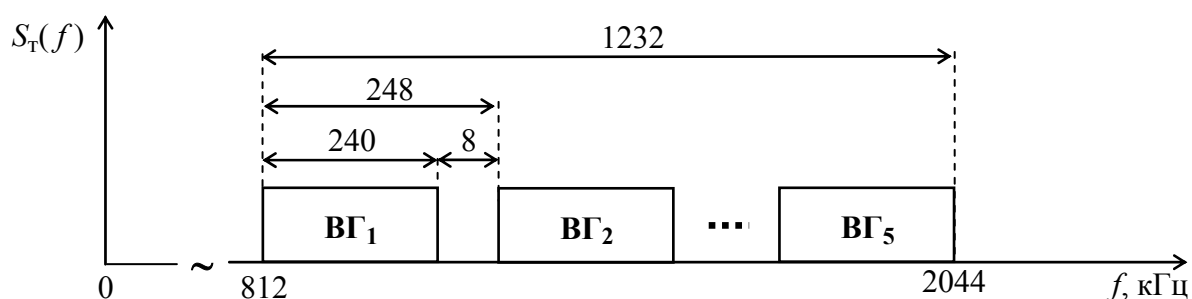


Рис. 2.4 — Спектр третичной группы телефонных каналов

Четвертичная группа состоит из 5 третичных групп, разнесенных между собой на защитный интервал частот 64 кГц и содержит $5 \times 300 = 1500$ каналов. Спектр $S_{\text{ч}}(f)$ вторичной группы каналов показан на рис. 2.5. Четвертичная группа занимает полосу частот 6416 кГц от 2108 до 8524 кГц.

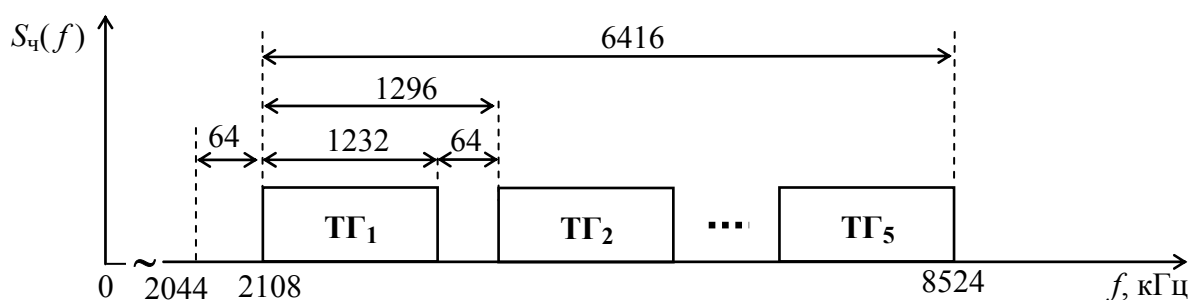


Рис. 2.5 — Спектр четвертичной группы телефонных каналов (5 по 300 = 1500 каналов), 2044 кГц — верхняя частота спектра третичной группы

2.3. Пик-фактор группового сигнала

Групповой сигнал состоит из множества некоррелированных сообщений, каждое из которых представляет собой случайный процесс. Поэтому групповой сигнал при достаточно большом числе каналов можно рассматривать как шумоподобный процесс с нормальным (гауссовским) распределением — в соответствии с центральной предельной теоремой теории вероятностей.

Из временной диаграммы группового сигнала (рис. 2.3) видно, что в некоторые моменты времени мгновенные значения напряжения достигают весьма больших значений. Однако частота появления этих значений относительно мала.

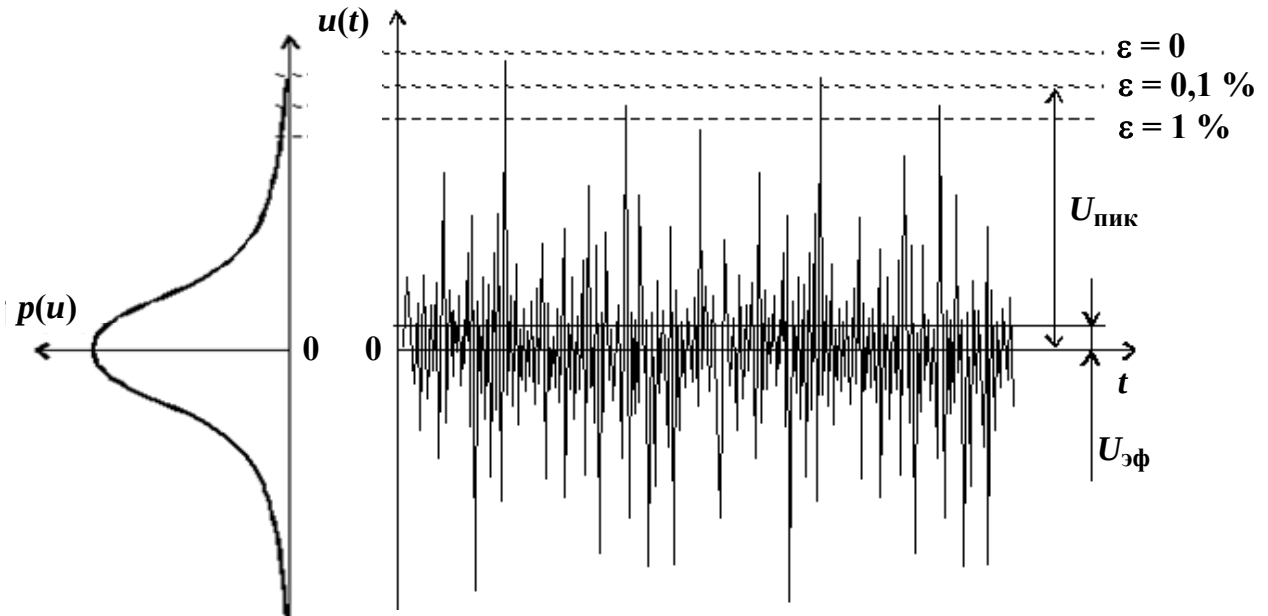
Систему связи можно удешевить, если не передавать эти редкие большие значения (функции времени) группового сигнала, а допустить некоторое ухудшение качества передачи, которое окажется приемлемым. В этой связи возникает вопрос: «На какое наибольшее значение напряжения группового сигнала необходимо рассчитывать систему связи?». Систему связи принято рассчитывать на квазипиковое значение $U_{\text{пик}}$ напряжения, которое может быть превышено в течение определенного времени. Относительное время ε превышения квазипикового значения рассчитывают по формуле

$$\varepsilon = \frac{\sum_i \Delta t_i}{T_p} = \frac{T_{\text{п}}}{T_p},$$

где Δt_i — i -й интервал времени, в течение которого напряжение группового сигнала превышает заданное квазипиковое значение; $T_{\text{п}} = \sum_i \Delta t_i$ — суммарное время превышения квазипикового значения; T_p — время работы системы связи.

Если оговорено значение параметра ε , то вместо термина «квазипиковое значение» обычно пользуются термином «пиковое значение».

Для высококачественных РРЛ связи допускается $\varepsilon = 0,1\%$. Это означает, что при работе такой системы связи в течение $T_p = 1000$ час допускается суммарное время превышения $T_{\text{п}} = 1$ час. Для низкокачественных РЛЛ допускается $\varepsilon = 1\%$.



$p(u)$ — плотность распределения мгновенных значений напряжения $u(t)$;

$U_{\text{пик}}$ — квазипиковое значение напряжения $u(t)$;

$U_{\text{эфф}}$ — эффективное значение напряжения $u(t)$

Рис. 2.3 — Временная диаграмма напряжения группового сигнала

Отношение пикового и эффективного значений напряжений называется пик-фактором, который определяется по формуле:

$$K_{\text{пф}} = U_{\text{пик}} / U_{\text{эфф}}.$$

Графики зависимости пик-фактора (рассчитанного в децибелах) от числа каналов n показаны на рис. 2.4 при различных значениях ϵ [4].

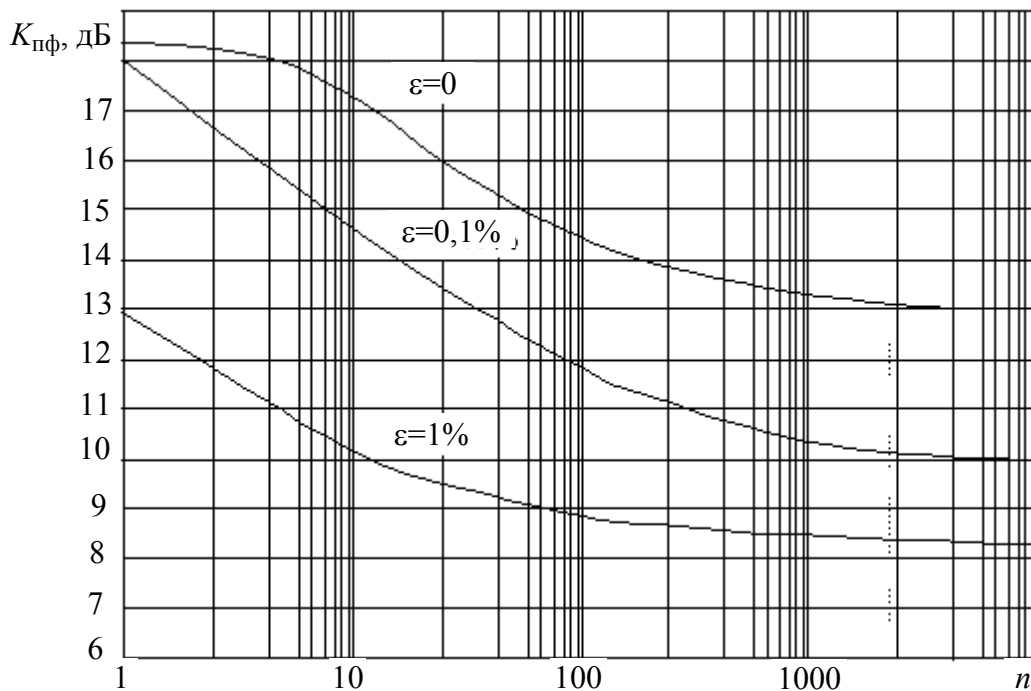


Рис. 2.4 — Зависимость пик-фактора $K_{\text{пф}}$ от числа каналов n

2.4. Шумы на выходе телефонного канала РРЛ с частотным разделением каналов

В телефонных каналах мешающее действие шумов определяется наличием в их частотном спектре составляющих, которые наиболее сильно заметны для человеческого слуха. В этой связи для характеристики шума на выходе канала используют мощность шума, который был пропущен через так называемый психометрический фильтр, частотная характеристика которого повторяет среднестатистическую частотную характеристику чувствительности человеческого уха. Поэтому в качестве одной из основных характеристик качества телефонного канала используют значение психометрической мощности шума на его выходе при значении мощности измерительного сигнала 1 мВт.

Поскольку условия распространения сигнала на пролётах РРЛ изменяются, то отношение сигнал-шум на входе приемника оконечной станции не является постоянным. Нормы МККТТ на качество каналов для точки нулевого относительного уровня устанавливают наибольшие допустимые значения психометрической мощности шума на выходе телефонного канала в зависимости от длительности наблюдения. В расчетах используют значение средней за одну минуту психометрической мощности шума, которое может превышать в течение не более двадцати процентов времени работы РРЛ в любом месяце. Допустимое значение психометрической мощности шума определяется нормами МККТТ.

Шум на выходе телефонного канала обусловлен как внутренними причинами, связанными с работой ВЧ тракта и группового тракта системы передачи, так и внешними помехами. Поскольку МККР требует, что некоторое ухудшение качества работы радиослужб при их совмещении, вызванное, например, увеличением уровня шума, должно быть скомпенсировано улучшением технических характеристик систем, то при проектировании РРЛ должен быть предусмотрен некоторый запас по качеству телефонного канала. Это означает, что мощность шума на выходе телефонного канала, обусловленная внутренними причинами, должна быть меньше нормы МККТТ.

В таблице 2.1 приведены основные составляющие шума в телефонном канале РРЛ с частотным разделением каналов и частотной модуляцией несущей с указанием параметров РРЛ, от которых зависят эти составляющие.

Таблица 2.1 — Составляющие шума в телефонном канале РРЛ

Составляющая шума	Причина возникновения	От чего зависит	Обозначение ⁵	Примечание
Тепловой шум	Шумы пассивных и активных элементов входных цепей и первых каскадов ВЧ тракта приемника	От отношения сигнал-шум на входе приемника	$P_{штвхпрм}$ $P_{штдопj}$	Мощность шума на выходе телефонного канала пропорциональна числу M пролётов РРЛ.
Переходный шум, обусловленный нелинейностью группового тракта	Попадание комбинационных составляющих, порождаемых сигналами различных телефонных каналов, в полосу частот, занимаемую рассматриваемым телефонным каналом	От нелинейности амплитудной характеристики группового тракта РРЛ	$P_{шнгтрi}$	Мощность шума на выходе телефонного канала пропорциональна числу m переприёмов по групповому спектру ⁶ , осуществляемых в РРЛ
Переходный шум за счёт нелинейности ФЧХ ВЧ тракта		От нелинейности ФЧХ ВЧ тракта РРЛ	$P_{шнфj}$	Принимают, что мощность шума на выходе телефонного канала пропорциональна числу M пролётов РРЛ
Переходный шум за счёт несогласованности волноводных трактов	Паразитная фазовая модуляция в результате сложения на входе приемника прямого и задержанного ЧМ сигналов	От несогласованности на концах волноводов	$P_{шнрj}$	Принимают, что мощность шума на выходе телефонного канала пропорциональна числу M пролётов РРЛ

2.5. Применение фазовых корректоров

При нелинейности фазовых характеристик каскадов ВЧ тракта нарушаются фазовые соотношения между составляющими спектра передаваемого радиосигнала, что приводит к появлению переходных шумов в телефонных каналах.

Обычно измеряется и анализируется не фазочастотная характеристика (ФЧХ), а модуль её первой производной, который называют частотной характеристикой группового времени запаздывания (ГВЗ), и по которому можно судить о времени прохождения сигналов разной частоты через ВЧ тракт.

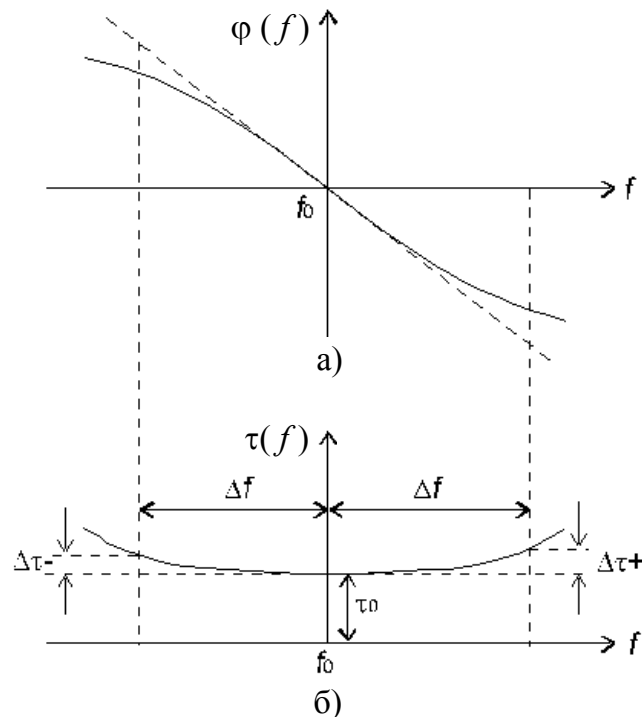
На рис. 2.5 изображены ФЧХ и частотная характеристика ГВЗ некоторой цепи. Линейной ФЧХ соответствует горизонтальная прямая частотная характеристика ГВЗ.

Важным показателем качества ВЧ тракта является неравномерность частотной характеристики ГВЗ (на рис 2.5 обозначена как $\Delta\tau$). В частности, для систем

⁵ Обозначение, принятое в этом документе. Пояснения приведены в приложении А «Перечень условных обозначений».

⁶ Под одним переприёмом по групповому спектру понимают однократное образование группового сигнала из одиночных сигналов телефонных каналов и однократное разделение группового сигнала на составляющие его одиночные сигналы телефонных каналов.

большой емкости (600-1920 каналов) неравномерность ГВЗ не должна превышать единиц наносекунд.



$\varphi(f)$ — ФЧХ; $\tau(f) = |d\varphi(f)/df|$ — характеристика ГВЗ; $\Delta\tau_+$ — неравномерность ГВЗ при расстройке $+\Delta f$, $\Delta\tau_-$ — неравномерность ГВЗ при расстройке $-\Delta f$.

Рис. 2.5 — Фазочастотная характеристика (а) и частотная характеристика группового времени запаздывания (б)

Для уменьшения неравномерности частотной характеристики ГВЗ применяют специальные корректирующие цепи, которые называют фазовыми корректорами или корректорами времени запаздывания.

На рис. 2.6 показаны схема включения фазового корректора, а также ФЧХ корректируемого каскада, фазового корректора при их раздельном и совместном действии.

При наличии фазовых искажений, обусловленных нелинейностью ФЧХ, в каком-либо каскаде ВЧ тракта (рис. 2.6 а) последовательно с этим каскадом включают фазовый корректор с ФЧХ, имеющей искажения обратные по знаку искажениям корректируемого каскада (рис. 2.6 б). В результате суммарная ФЧХ каскада и фазового корректора становится более линейной (рис. 2.6 в).

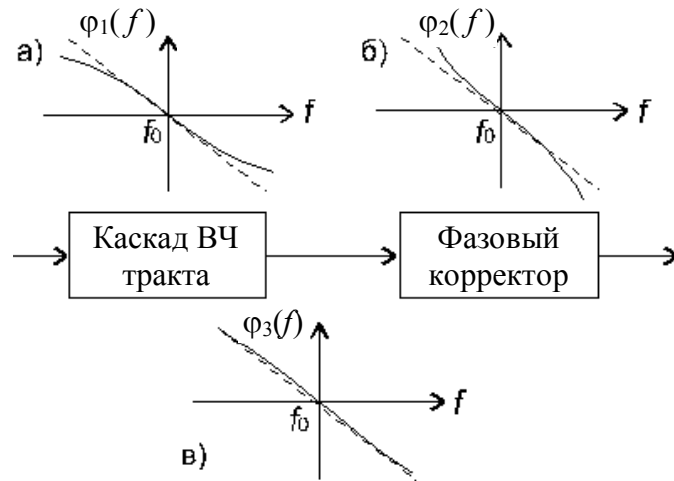


Рис. 2.6 — Принцип использования фазового корректора

3. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Расчет и выбор исходных данных производится в соответствии с двумя последним цифрам зачетной книжки (X — предпоследняя цифра, Y — последняя цифра). Цифры X и Y входят в формулы, которые используются для расчета исходных данных, а также используются при выборе данных по таблицам, приведенным в данных методических указаниях.

Контрольная работа выполняется в виде отдельного документа (на листах белой бумаги формата А4 либо в ученической тетради) и оформляется в соответствии с требованиями кафедры к оформлению текстовых документов [7], а также требований действующих стандартов.

При выполнении контрольной работы необходимо применять средства вычислительной техники для проведения расчетов, построения графиков и компьютерной верстки материалов.

При оформлении контрольной работы следует ссылаться на использованные библиографические источники. Ссылки в тексте контрольной работы даются в квадратных скобках: $[n]$, где n — порядковый номер источника в библиографическом списке, который оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7.1-84 и приводится в конце контрольной работы. В перечень ссылок включают только источники информации, на которые сделаны ссылки в контрольной работе, и располагают их в порядке, в котором эти ссылки приведены в контрольной работе.

Примерами библиографического описания источников информации является перечень ссылок, приведенный в данных методических указаниях.

Расчеты должны сопровождаться подробными пояснениями и выкладками, а ответы на теоретические вопросы должны быть краткими и содержать суть излагаемого материала.

4. ЗАДАНИЕ ПО КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

4.1. Задача №1

Радиорелейная линия протяженностью $L = 280 + 10(X + Y)$ км, предназначена для передачи телефонных сообщений. Групповой сигнал РРЛ сформирован по принципу частотного разделения каналов. В РРЛ используется частотная модуляция несущей групповым сигналом.

Радиорелейная линия имеет число пролетов

$$M = 1 + \text{Int}\left(\frac{L}{50 - Y}\right),$$

где L — протяженность РРЛ в километрах; $\text{Int}(z)$ — оператор, означающий определение целой части числа z , например, $\text{Int}(24,7) = 24$.

Разработчиком линии взят запас для психофизической мощности шумов в телефонном канале в точке нулевого относительного уровня, равный 40 % от норм МККТТ на качество телефонного канала, с таким расчетом, чтобы на двух различных пролетах линии (назовем их пролет А и пролет Б) при необходимости можно было бы допустить присутствие в рабочей полосе частот приемника постоянно действующих помех от передатчиков других радиосредств без превышения норм МККТТ на качество телефонного канала.

Рассчитать наибольшую допустимую мощность помех на входе приемников, которые принимают сигналы, прошедшие через пролеты А и Б. Рассчитать соответствующие отношения сигнал/помеха на входе приемников при выполнении следующих условий:

1) на пролете А действует помеха, которая представляет собой сигнал другой (мешающей) РРЛ, которая аналогична рассматриваемой и имеет число телефонных каналов $n_{\text{меш}}$, указанное в таблице 4.1 для разных вариантов заданий X ;

2) на пролете Б действует помеха, которая представляет собой случайный процесс с равномерным энергетическим спектром в полосе рабочих частот приемника и нормальным распределением мгновенных значений;

3) выбранный разработчиком линии запас по психофизической мощности шумов в телефонном канале при действии помех разделён поровну между пролетами А и Б.

Таблица 4.1 — Число телефонных каналов $n_{\text{меш}}$ в сигнале мешающей РРЛ

Вариант задания, X	0	1; 2; 3	4; 5; 6	7; 8; 9
Число мешающих каналов $n_{\text{меш}}$	300	600	720	960

Сравнить рассчитанные значения мощности допустимых помех, действующих в пролетах «А» и «Б».

Дополнительные исходные данные для расчета приведены ниже.

1) Полоса частот, занимаемая одним телефонным каналом в спектре группового сигнала, составляет $\Delta F_k = 4$ кГц.

2) Модуляция и демодуляция радиосигнала осуществляются только на оконечных станциях РРЛ, т. е. число переключений по групповому спектру m равно единице.

3) Число телефонных каналов n в передаваемом полезном сигнале и состав группового сигнала, приведены в таблице 4.2 для разных вариантов Y заданий.

Таблица 4.2 — Число телефонных каналов и состав передаваемого группового сигнала в зависимости от варианта задания

Вариант задания, Y	0	1; 2; 3	4; 5; 6	7; 8; 9
Число каналов n	300	600	720	960
Состав группового сигнала	ВГ1...ВГ5	ТГ1+ТГ2	2ТГ+2ВГ	3ТГ+ПГ

Примечание.

При формировании состава группового сигнала принять, что присоединение групп меньшего порядка к группам более высокого порядка осуществляется со стороны верхних частот. Например, при необходимости передавать 960 телефонных каналов групповой сигнал будет сформирован из трёх третичных групп и одной первичной группы (3ТГ+ПГ), при этом первичная группа будет располагаться выше по частоте следом за третьей третичной группой. Между группами применяют защитный интервал частот (см. принцип формирования групп телефонных каналов при их частотном уплотнении в п. 2.2).

4) Значения защитных частотных интервалов между спектрами групп телефонных каналов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 — Значения защитных частотных интервалов между группами телефонных каналов

Соседние группы каналов	ВГ-ВГ	ТГ-ТГ, ТГ-ВГ, ТГ-ПГ
Защитный интервал частот между соседними группами, кГц	8	64

5) Мощность переходных шумов в наиболее высокочастотном телефонном канале⁷, обусловленных нелинейностью i -го группового тракта, принять равной $P_{\text{шнгтр}i} = (12 + X)$ пВт.

6) Мощность переходных шумов в наиболее высокочастотном телефонном канале, обусловленных нелинейностью фазочастотной характеристики высокочастотного канала (на j -м пролете РРЛ), принять равной $P_{\text{шнф}j} = (10 + Y)$ пВт.

7) Мощность переходных шумов в наиболее высокочастотном телефонном канале, вызванных рассогласованием приемо-передающего волноводного тракта j -й станции РРЛ, принять равной $P_{\text{шнр}j} = (3 + Y)$ пВт.

⁷ Имеется в виду, что в спектре группового сигнала этот канал занимает самую верхнюю полосу частот.

8) Помехами, которые возникают внутри РРЛ от передатчиков, установленных на других пролетах этой же РРЛ, пренебречь.

9) Эффективная девиация частоты, приходящаяся на один канал, $\Delta f_k = 200$ кГц.

10) Коэффициент шума приемника принять равным

$$N_{\text{ш}} = 7 + \frac{X + Y}{10}, \text{ дБ.}$$

11) Значения коэффициента ослабления помехи $K_{\text{оп}}$ приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 — Значения коэффициента $K_{\text{оп}}$ ослабления помехи для РРЛ

Число $n_{\text{меш}}$ каналов в мешающем сигнале (в помехе)	$K_{\text{оп}}$ при различном числе n каналов, дБ											
	$n=300$			$n=600$			$n=720$			$n=960$		
300	23	22	25	21	17	24	21	14	24	23	13	26
	29	10		28	4		27	0		7	-8	
600	23	22	26	20	18	23	21	15	23	22	14	25
	28	10		28	3		27	0		6	-9	
720	23	22	26	20	18	23	20	15	23	21	14	24
	27	9		27	2		26	-1		5	-10	
960	23	24	26	21	20	24	21	19	24	20	20	23
	21	2		21	-4		20	-7		-1	-16	

Примечание.

В верхнем ряду каждой ячейке таблицы (в порядке слева направо) указаны следующие значения $K_{\text{оп}}$:

— первое значение соответствует наиболее высокочастотному телефонному каналу при нулевой абсолютной расстройке $\Delta f_p = 0$ между несущими частотами полезного и мешающего сигналов;

— второе значение соответствует наиболее высокочастотному телефонному каналу при расстройке $\Delta f_p = F_{\text{в}}$, где $F_{\text{в}}$ — верхняя частота в спектре группового сигнала;

— третье значение соответствует наиболее высокочастотному телефонному каналу при расстройке $\Delta f_p = 2F_{\text{в}}$.

В нижнем ряду каждой ячейке таблицы (в порядке слева направо) указаны следующие значения $K_{\text{оп}}$:

— первое значение соответствует наиболее низкочастотному телефонному каналу при расстройке $\Delta f_p = F_{\text{н}}$, где $F_{\text{н}}$ — нижняя частота в спектре группового сигнала;

— второе значение представляет собой минимально возможное значение

$K_{\text{оп}}$ в верхнем телефонном канале при расстройке $\Delta f_p = F_B$.

12) Отношение эффективной шумовой полосы частот приемника к его полосе пропускания по уровню -3дБ принять равным $k_f = 1,15$.

13) Нормы МККТТ на психофотметрическую мощность шума, которая может быть превышена в течение не более 20 % времени любого месяца приведены в таблице В.1 (приложение В).

4.2. Задача №2

С учетом исходных данных задачи 1 и результатов ее решения определить приращение психофотметрической мощности шума на выходе наиболее высокочастотного телефонного канала, обусловленное действием на вход приемника одной радиорелейной станции помехи от бортового передатчика искусственного спутника Земли, расположенного на геостационарной орбите (помеха действует в полосе частот основного канала приёма приёмника).

Дополнительные исходные данные:

1) плотность потока мощности помехи в полосе частот 4 кГц

$$\Phi_{4\text{кГц}} = -152 \text{ дБ} \cdot \text{Вт/м}^2;$$

2) коэффициент усиления приемной антенны в направлении прихода помехи

$$G_{\text{прм}}(\theta) = (X + Y) / 2 \text{ дБ};$$

3) частоту настройки приемника принять равной

$$f_H = 2 + 0,2(X + Y) \text{ ГГц}.$$

4) Потерями в фидере приемной антенны пренебречь.

Примечание. С приемлемой для практики точностью можно принять, что помеха имеет характер белого шума и кроме этого, поскольку в космических системах связи используют большие индексы угловой модуляции и применяют сигналы дисперсии⁸, то при расчете можно принять, что энергетический спектр помехи близок к равномерному и превышает значение шумовой полосы приёмника.

⁸ Сигнал дисперсии – специальный сигнал с известными характеристиками, который используют для дополнительного модулирования несущей с целью исключения в энергетическом спектре передаваемого сигнала дискретных составляющих и уменьшения неравномерности энергетического спектра. Перед выделением передаваемого сообщения сигнал дисперсии подавляется в приемнике.

5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

5.1. Методика решения задачи №1.

Решение задачи №1 основано на следующих положениях.

Расчет допустимой мощности помехи и отношения сигнал-помеха на входе приемников следует выполнять для телефонного канала, который является наиболее высокочастотным в спектре группового сигнала, поскольку для этого канала сложнее всего выполнить требования МККТТ по допустимому уровню психофизической мощности шума.

Поскольку внутренние шумы и шумы, порождаемые внешними помехами РРЛ, являются аддитивными, то полная мощность помехи может быть найдена как сумма мощностей ее составляющих.

В задаче предполагается, что уменьшение шума на выходе телефонного канала достигают только за счёт уменьшения мощности теплового шума, т. е. за счет увеличения отношения сигнал-шум на входе приемника в каждом пролете РРЛ.

Пусть, например, задано $X = 0$, $Y = 9$. Тогда с учетом условия задачи находим протяженность L и число пролетов РРЛ M ⁹:

$$L = 280 + 10(X + Y) = 280 + 10(0 + 9) = 370 \text{ км}$$

$$M = 1 + \text{Int}\left(\frac{L_{\text{км}}}{50 - Y}\right) = 1 + \text{Int}\left(\frac{370}{50 - 9}\right) = 1 + 9 = 10.$$

В соответствии с заданным вариантом задания определяем по таблице 4.2 состав группового сигнала. Для $Y = 9$ групповой сигнал (ЗТГ+ПГ) сформирован из трёх третичных групп и одной первичной группы, которая располагается на более высоких частотах, чем последняя (третья) третичная группа. Из таблицы 4.3 следует, что между последней третичной группой и первичной группой имеется защитный интервал 64 кГц. С учетом перечисленных данных заполняем таблицу 5.1 и определяем максимальную частоту группового сигнала, а также общее число телефонных каналов

Таблица 5.1 — Состав группового сигнала и положение групп на оси частот

Группа каналов	Частотный диапазон, кГц	Защ. интервал, кГц	Частотный диапазон, кГц	Защ. интервал, кГц	Частотный диапазон, кГц	Защ. интервал, кГц	Частотный диапазон, кГц	Число тлф каналов
ТГ1	812...2044	64	-	-	-	-	-	300
ТГ2	-	-	2108...3340	64	-	-	-	300
ТГ3	-	-	-	-	3404...4636	64	-	300
ПГ	-	-	-	-	-	-	4700...4748	60
Верхняя частота в спектре группового сигнала, кГц:							4748	-
Всего телефонных каналов:								960

⁹ Следует понимать, что эти и аналогичные им формулы не имеют физического смысла и применяются только для задания вариантов условий задачи.

Находим среднюю частоту в спектре группового сигнала для наиболее высокочастотного телефонного канала

$$F_{кв} = F_{в} - \frac{\Delta F_{к}}{2} = 4748 - \frac{4}{2} = 4746 \text{ кГц},$$

где $F_{в} = 4748 \text{ кГц}$ — верхняя частоты в спектре группового сигнала; $\Delta F_{к} = 4 \text{ кГц}$ — принимаемая в расчётах ширина полосы частот телефонного канала.

С учетом норм МККТТ (приложение В, таблица В.1) находим допустимую (для заданной протяженности РРЛ) психофотметрическую мощность шума на выходе телефонного канала в точке нулевого относительного уровня

$$P_{ш \text{ МККТТ}} = 3L = 3 \cdot 370 = 1110 \text{ пВт}.$$

Рассчитываем приходящийся на один пролет линии (А или Б) запас по психофотметрической мощности шума на выходе телефонного канала в точке нулевого относительного уровня

$$P_{ш \text{ меш зап}} = \frac{k_{\text{зап}} P_{ш \text{ МККТТ}}}{2} = \frac{0,4 \cdot 1100}{2} = 222 \text{ пВт},$$

где $k_{\text{зап}} = 0,4$ — коэффициент запаса (40 % запаса, взятого по условию задачи разработчиком РРЛ для пролётов А и Б), 2 — число пролётов, на которых могут действовать помехи. В нашей РРЛ необходимо будет обеспечить мощность тепловых шумов на величину этого запаса меньше того значения, которое в сумме с мощностями других шумов удовлетворяло бы требованиям норм МККТТ.

Из условия задачи рассчитываем мощность переходных шумов в наиболее высокочастотном i -м телефонном канале, обусловленную нелинейностью группового тракта,

$$P_{ш \text{ нгр тр}} = m P_{ш \text{ нгр тр } i} = m(12 + X) = 1 \cdot (12 + 0) = 12 \text{ пВт}.$$

Здесь значение коэффициента m взято равным 1, поскольку по условию задачи «число переприятий по групповому спектру равно единице», т.е. модуляция и демодуляция радиосигнала осуществляются только на конечных станциях РРЛ.

Вычисляем значение психофотметрической мощности шума на выходе телефонного канала в точке нулевого относительного уровня, которое не должно превышать по причинам работы самой РРЛ (без внешних помех и шума от нелинейности группового тракта):

$$P_{ш. \text{доп}} = P_{ш \text{ МККТТ}} - P_{ш \text{ меш зап}} - P_{ш \text{ нгр тр}} = 1110 - 222 - 12 = 876 \text{ пВт}.$$

Полученное значение есть лимит на суммарную мощность шумов следующих видов (см. таблицу 2.1 в разделе 2.4. Шумы на выходе телефонного канала РРЛ с частотным разделением каналов):

- Переходный шум за счёт нелинейности ФЧХ ВЧ тракта;
- Переходный шум за счёт несогласованности волноводных трактов;
- Тепловой шум;
- Другие шумы, которыми в силу их малости пренебрегаем и в рамках этой контрольной работы не рассматриваем.

Из условия задачи рассчитываем мощность переходных шумов, вызываемых нелинейностью ФЧХ высокочастотного тракта на j -м пролете РРЛ

$$P_{\text{шнф}j} = 10 + Y = 10 + 9 = 19 \text{ пВт} .$$

При числе пролётов $M=10$ суммарное значение мощности будет равно $P_{\text{шнф}} = P_{\text{шнф}j} \cdot M = 19 \cdot 10 = 190 \text{ пВт}$

Из условия задачи рассчитываем мощность переходных шумов вызванных рассогласованием приемо-передающего волноводного тракта j -й станции РРЛ

$$P_{\text{шнр}j} = 3 + Y = 3 + 9 = 12 \text{ пВт} .$$

При числе пролётов $M=10$ суммарное значение мощности будет равно $P_{\text{шнр}} = P_{\text{шнр}j} \cdot M = 12 \cdot 10 = 120 \text{ пВт} .$

Тогда из найденного лимита для мощности теплового шума¹⁰ на выходе телефонного канала, которая будет допустимой для нашей РРЛ, остаётся

$$P_{\text{штдоп}} = P_{\text{шдоп}} - P_{\text{шнф}} - P_{\text{шнр}} = 876 - 190 - 120 = 566 \text{ пВт} .$$

Если считать, что шумовые свойства приёмников каждой радиорелейной станции одинаковы (по условию задачи это так и есть), то лимит теплового шума, приходящийся на одну радиорелейную станцию $P_{\text{штдоп}j}$, получится равным

$$P_{\text{штдоп}j} = \frac{P_{\text{штдоп}}}{M} = \frac{566}{10} = 56,6 \text{ пВт} ,$$

где $M = 10$ — число пролётов РРЛ в нашей задаче.

¹⁰ Это значение мощности тепловых шумов в верхнем телефонном канале может превышать в течение не более чем 20 % (двадцати процентах) времени любого месяца. Поэтому мощность сигнала на входе приемника должна быть не менее рассчитываемого значения в течение 80 % (восемидесяти процентов) и более от времени любого месяца.

Мощность сигнала на входе приемника одной станции РРЛ и мощность тепловых шумов на выходе телефонного канала $P_{\text{шт вых}}$, вносимых одной радиорелейной станцией, связаны друг с другом следующим образом [1, стр. 94]:

$$P_{\text{с вх прм}} = \frac{P_{\text{изм}}}{P_{\text{шт } j}} k T_0 N_{\text{ш}} \Delta F_{\text{к}} \left(\frac{F_{\text{к в}}}{\Delta f_{\text{к}}} \right)^2 k_{\text{п}}^2 \beta_{\text{пр}}(\alpha_{\text{в}}), \quad (5.1)$$

где $P_{\text{изм}}$ — мощность измерительного сигнала; $P_{\text{шт } j}$ — мощность шума на выходе телефонного канала, обусловленная тепловым шумом на входе приёмника, работающего в j -м пролёте РРЛ; k — постоянная Больцмана; T_0 — абсолютная температура входных цепей приемника (в расчете принимаем $T_0 = 290$ К); $\Delta F_{\text{к}}$ — ширина полосы частот телефонного канала (в расчете принимаем $\Delta F_{\text{к}} = 4$ кГц); $F_{\text{к в}}$ — средняя частота верхнего телефонного канала в групповом сигнале (значение рассчитано нами ранее); $\Delta f_{\text{к}}$ — эффективная девиация частоты на канал (задана в условии задачи); $k_{\text{п}} = 0,75$ — психометрический коэффициент (учитывает ослабление мощности шума психометрическим фильтром, установленным на выходе телефонного канала); $\beta_{\text{пр}}(\alpha_{\text{в}})$ — квадрат модуля коэффициента передачи восстанавливающего контура, применяемого на выходе приемника для коррекции предискажений группового сигнала, введенных на передающей станции перед подачей группового сигнала на вход модулятора передатчика (см. приложение А); $\alpha_{\text{в}} = F_{\text{к в}}/F_{\text{в}}$.

Так как обычно $F_{\text{к в}} \approx F_{\text{в}}$, то в расчете можно принять, что $\alpha_{\text{в}} = 1$. Это соответствует значению $\beta_{\text{пр}}(\alpha_{\text{в}}) = 0,41$.

Поскольку в РРЛ тепловые шумы вносятся не только приёмником конечной станции, но и приёмниками предыдущих промежуточных станций, причём сложение этих шумов происходит аддитивно, то для нахождения требуемой мощности сигнала на входе приёмника, при которой будет обеспечено непревышение значения $P_{\text{шт доп}}$ (допустимая мощность теплового шума на выходе телефонного канала (для всей РРЛ)), формулу (5,1) необходимо переписать, добавив в числитель множителем число пролётов РРЛ (M) и заменив $P_{\text{шт } j}$ на $P_{\text{шт доп}}$:

$$P_{\text{с вх прм}} = M \frac{P_{\text{изм}}}{P_{\text{шт доп}}} k T_0 N_{\text{ш}} \Delta F_{\text{к}} \left(\frac{F_{\text{к в}}}{\Delta f_{\text{к}}} \right)^2 k_{\text{п}}^2 \beta_{\text{пр}}(\alpha_{\text{в}}). \quad (5.2)$$

$$P_{\text{с вх прм}} = 10 \cdot \frac{10^{-3}}{566 \cdot 10^{-12}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 10^{\frac{7}{10}} \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{4746 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot 0,75^2 \cdot 0,41 \approx 0,184 \text{ мкВт}.$$

Следует отметить, что тот же результат мы получим, если в формулу (5.1) вместо $P_{штj}$ подставим значение найденного лимита теплового шума, приходящийся на одну радиорелейную станцию $P_{шт доп j}$:

$$P_{с вх прм} = \frac{P_{изм}}{P_{шт доп j}} kT_0 N_{шт} \Delta F_k \left(\frac{F_{кв}}{\Delta f_k} \right)^2 k_{п}^2 \beta_{пр}(\alpha_v)$$

$$P_{с вх прм} = \frac{10^{-3}}{56,6 \cdot 10^{-12}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 290 \cdot 10^{\frac{7}{10}} \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{4746 \cdot 10^3}{200 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot 0,75^2 \cdot 0,41 \approx 0,184 \text{ мкВт}.$$

Перейдём к нахождению наибольшей допустимой мощности помехи, которая может оказывать мешающее влияние работе РРЛ на пролёте А.

С учетом заданных значений $X = 0$, $Y = 9$ по таблицам 4.2, 4.4 для числа телефонных каналов, передаваемых по РРЛ ($n = 960$), и для случая, когда число мешающих каналов $n_{меш} = 300$ из значений, представленных в ячейке таблицы, выбираем значение коэффициента ослабления помехи ($K_{оп} = -8$ дБ), поскольку оно соответствует наихудшей ситуации влияния помехи.

Из определения коэффициента ослабления помехи $K_{оп}$ (см раздел 2.1. Электромагнитная совместимость радиорелейной линии) следует, что в нашей задаче

$$\frac{P_{свых}}{P_{шт меш зап}} = K_{оп} \frac{P_{с вх прм}}{P_{меш А}},$$

где $P_{свых}$ — мощность сигнала на выходе телефонного канала в точке нулевого относительного уровня, которую принимаем равной мощности измерительного сигнала $P_{изм} = 10^{-3}$ Вт.

Переписав это выражение относительно $P_{меш А}$, находим допустимую мощность помехи, действующей на входе приемника, на пролете «А» РРЛ.

$$P_{меш А} = \frac{K_{оп} P_{шт меш зап} P_{с вх прм}}{P_{свых}} = \frac{10^{\frac{-8}{10}} \cdot 222 \cdot 10^{-12} \cdot 0,184 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} \approx 6,47 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}.$$

Находим отношение сигнал/помеха на входе приемника, работающего в пролете «А», которое должно расцениваться как минимально допустимое отношение:

$$q_{A, \text{дБ}} = 10 \lg \frac{P_{\text{с вх прм}}}{P_{\text{меш А}}} = 10 \lg \frac{0,184 \cdot 10^{-6}}{6,47 \cdot 10^{-15}} \approx 74,5 \text{ дБ}.$$

Это означает, что ЭМС нашей РРЛ будет обеспечиваться, если на пролёте А уровень помехи от другой (мешающей) РРЛ по отношению к уровню полезного сигнала будет не более, чем минус 75 дБ.

Перейдём к нахождению максимально допустимой мощности помехи на входе приемника радиорелейной станции, работающей на пролёте Б.

Идея расчёта состоит в следующем. Поскольку по условию задачи помеха представляет собой белый шум, то по свойствам она совпадает с тепловым шумом, действующим на входе приёмника. Тогда действие помехи на вход приёмника можно рассматривать как соответствующее эквивалентное увеличение мощности теплового шума на входе приёмника. Если тепловой шум на входе приёмника $P_{\text{шт вх прм}}$ создаёт на выходе телефонного канала мощность шума $P_{\text{шт доп } j}$, то шумовая помеха с предельно допустимым уровнем мощности $P_{\text{меш Б}}$ должна создавать на выходе телефонного канала мощность шума не более чем $P_{\text{шт меш зап}}$. Поскольку рассматриваемые шумы не коррелированы, то они передаются на выход телефонного канала аддитивно (каждый из них — через некоторый один и тот же коэффициент усиления по мощности, значение которого для рассматриваемого расчёта не представляет интереса). Это позволяет записать:

$$\frac{P_{\text{шт доп } j}}{P_{\text{шт вх прм}}} = \frac{P_{\text{шт меш зап}}}{P_{\text{меш Б}}}, \text{ или } P_{\text{меш Б}} = \frac{P_{\text{шт вх прм}} P_{\text{шт меш зап}}}{P_{\text{шт доп } j}}. \quad (5.3)$$

В это выражение входит неизвестное до этого момента значение мощности теплового шума на входе приёмника. Для расчёта этого значения нам понадобится значение шумовой полосы приёмника. Шумовая полоса приёмника связана с шириной спектра ЧМ сигнала Π , коэффициентом прямоугольности формы характеристики частотной избирательности приёмника и нестабильностью частот гетеродинов.

Расчёт шумовой полосы частот приёмника произведём следующим образом.

Сначала рассчитаем среднюю мощность группового сигнала. Это можно сделать двумя способами.

Способ 1:

$$P_{\text{ср}} = 13 + 10 \lg(n) \text{ дБм},$$

где n — число одиночных телефонных сообщений в групповом сигнале,

$$P_{\text{ср, дБ}} = -13 + 10 \lg(960) = 16,82 \text{ дБм};$$

$$P_{\text{ср}} = 10^{\frac{P_{\text{ср, дБм}}}{10}} = 48 \text{ мВт}.$$

Способ 2:

$$P_{\text{ср}} = P_{\text{к}} n = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 960 = 48 \text{ мВт},$$

где $P_{\text{к}} = 50 \text{ мВт}$ – средняя мощность одиночного телефонного сообщения (обеспечивается при формировании группового сигнала).

Видим, что значения средней мощности группового сигнала, вычисленные двумя способами, совпадают.

Затем найдём значение пик-фактора, соответствующего числу каналов $n = 960$, при относительном времени превышения пикового уровня $\varepsilon = 0,1\%$ (см. рис. 2.4)

$$K_{\text{пф,дБ}} = 10,5 \text{ дБ};$$

$$K_{\text{пф}} = 10^{\frac{K_{\text{пф,дБ}}}{20}} = 10^{\frac{10,5}{20}} \approx 3,35.$$

Затем рассчитаем пиковую девиацию частоты

$$\Delta f_{\text{пик}} = K_{\text{пф}} \Delta f_{\text{эфф}} = 3,35 \cdot 200 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{48 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}} \approx 4642 \text{ кГц},$$

где $\Delta f_{\text{эфф}} = \Delta f_{\text{к}} \sqrt{P_{\text{ср}}/P_{\text{изм}}}$ — эффективная девиация несущей, модулированной групповым сообщением; $\Delta f_{\text{к}}$ — эффективная девиация частоты, приходящаяся на один телефонный канал.

Затем рассчитаем индекс частотной модуляции

$$m_f = \frac{\Delta f_{\text{пик}}}{F_{\text{в}}} = \frac{4642 \cdot 10^3}{4748 \cdot 10^3} \approx 0,98.$$

Затем найдём необходимую ширину спектра частотно-модулированного сигнала

$$\Pi = 2F_{\text{в}}(1 + m_f + \sqrt{m_f}) = 2 \cdot 4748 \cdot 10^3 (1 + 0,98 + \sqrt{0,98}) \approx 28203 \text{ кГц}.$$

В итоге рассчитаем шумовую полосу частот приемника

$$\Delta f_{\text{шпрм}} \approx k_{\text{пр}} k_{\text{н}} \Pi = 1,15 \cdot 1,005 \cdot 28203 \approx 32595 \text{ кГц},$$

где $k_{\text{пр}} = 1,15$ — коэффициент, учитывающий степень прямоугольности характеристики частотной избирательности приемника; $k_{\text{н}} = 1,005$ — коэффициент, учи-

тывающий нестабильности частот гетеродинов и неточность автоподстройки промежуточной частоты приемника.

Теперь, зная шумовую полосу частот приёмника, несложно найти мощность теплового шума на входе приёмника. Для этого нужно вычислить произведение $kT_0\Delta f_{\text{ш прм}}$, где T_0 — температура входных цепей приёмника. При $T_0 = 293\text{ К}$ мощность теплового шума на входе приёмника она составит:

$$P_{\text{шт вх прм}} = kT_0\Delta f_{\text{ш прм}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293 \cdot 32595 \cdot 10^3 \approx 0,13 \text{ пВт}.$$

Подставляя полученные значения в (5.3), получим

$$P_{\text{меш Б}} = \frac{0,13 \cdot 10^{-12} \cdot 222 \cdot 10^{-12}}{56,6 \cdot 10^{-12}} \approx 0,51 \text{ пВт}.$$

При этом минимально допустимое отношение сигнал-помеха на входе приемника, работающего в пролёте «Б», составит

$$q_{\text{Б, дБ}} = 10 \lg \frac{P_{\text{с вх прм}}}{P_{\text{меш Б}}} = 10 \lg \frac{0,184 \cdot 10^{-6}}{0,51 \cdot 10^{-12}} \approx 55,6 \text{ дБ}.$$

Это означает, что ЭМС нашей РРЛ будет обеспечиваться, если на пролёте Б уровень помехи по отношению к уровню полезного сигнала будет не более, чем минус 56 дБ.

Сравнивая рассчитанные значения мощности допустимых помех, действующих в пролётах «А» и «Б», видим, что допустимый уровень помехи в пролёте «А» меньше, чем в пролёте «Б» примерно на 19 дБ. Иными словами, шумовая помеха оказывает менее вредное воздействие, чем помеха, похожая на полезный сигнал (при равных мощностях помех на входе приёмника).

Следует так же отметить, что если источником шумовой помехи является, например, передатчик космической линии связи, расположенный на искусственном спутнике Земли, и диаграмма направленности передающей антенны обеспечивает «накрытие» части или даже всех радиорелейных станций РРЛ, то можно считать, что шумовая помеха действует не только на пролёте Б, а и на всех «накрытых» помехой пролётах РРЛ. В этом случае рассчитанное нами значение $P_{\text{меш Б}}$ необходимо будет разделить на число «накрытых» помехой пролётов.

5.2. Методика решения задачи №2

С учетом условия задачи определяем коэффициент усиления приемной антенны в направлении прихода электромагнитной энергии помехи

$$G_{\text{прм}}(\theta) = (X + Y) / 2 = (0 + 9) / 2 = 4,5 \text{ дБ},$$

где θ — угол между осью диаграммы направленности антенны и направлением на источник сигнала или помехи.

Рассчитываем рабочую длину волны приемника

$$\lambda = \frac{c}{f_{\text{н}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{3,8 \cdot 10^9} = 0,079 \text{ м},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света; $f_{\text{н}} = 2 + 0,2(X + Y) = 2 + 0,2 \cdot (0 + 9) = 3,8$ ГГц — частота настройки приемника, рассчитываемая из условия задачи.

Используя заданное в условии задачи значение плотности потока мощности помехи в полосе частот 4 кГц, $\Phi_{4\text{кГц}}$, пересчитываем мощность помехи на вход приемника (по условию задачи потерями в фидере пренебрегаем):

$$P_{\text{меш вх прм, 4кГц}} = \Phi_{4\text{кГц}} \frac{G_{\text{прм}}(\theta) \lambda^2}{4\pi} = 10^{-152} \cdot 10^{\frac{4,5}{10}} \cdot \frac{0,079^2}{4\pi} = 8,83 \cdot 10^{-7} \text{ пВт}.$$

Рассчитываем мощность помехи на входе приемника в шумовой полосе частот приемника $\Delta f_{\text{ш прм}}$:

$$P_{\text{меш вх прм}} = P_{\text{меш вх прм, 4кГц}} \frac{\Delta f_{\text{ш прм}}}{4 \text{ кГц}} = 8,83 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{32595 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3} \approx 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ пВт}.$$

Воспользуемся идеей расчёта, которая привела нас к выражению (5.3). Поскольку шум помехи на входе приёмника $P_{\text{меш вх прм}}$ и тепловой шум на входе приёмника $P_{\text{шт вх прм}}$ не коррелированы, то они передаются на выход телефонного канала аддитивно (каждый из них — через некоторый один и тот же коэффициент усиления по мощности, значение которого для рассматриваемого расчёта не представляет интереса). Тогда:

$$\frac{P_{\text{шт доп } j}}{P_{\text{шт вх прм}}} = \frac{\Delta P_{\text{ш вых}}}{P_{\text{меш вх прм}}},$$

где $\Delta P_{\text{ш вых}}$ — искомое приращение шума на выходе телефонного канала.

$$\Delta P_{\text{ш вых}} = \frac{P_{\text{меш вх прм}} P_{\text{шт доп } j}}{P_{\text{шт вх прм}}} = \frac{7,2 \cdot 10^{-15} \cdot 56,6 \cdot 10^{-12}}{0,13 \cdot 10^{-12}} \approx 3,1 \text{ пВт}.$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. Системы радиосвязи: Учебник для вузов / Н.И. Калашников, Э.И. Крупницкий, И.Л. Доронов и др.; Под ред. Н.И. Калашникова. — М.: Радио и связь, 1988. — 352 с.
2. Егоров Е.И. Использование радиочастотного спектра и помехи / Е.И. Егоров, Н.И. Калашников, А.С. Михайлов. — М.: Радио и связь, 1986. — 304 с.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов / И.С. Гоноровский. — М.: Радио и связь, 1986. — 512 с.
4. Мордухович Л.Г. Системы радиосвязи. Курсовое проектирование: Учеб. Пособие для вузов / Л.Г. Мордухович, А.П. Степанов. — М.: Радио и связь, 1987. — 192 с.
5. Благовещенский Д. В. Радиосвязь и электромагнитные помехи: Учебное пособие / Д. В. Благовещенский. — СПб.: РИО ГУАП, 2002. — 69 с.
6. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость / М.П. Бадер. — М.: УМК МПС России, 2002. — 638 с.
7. Методические указания по оформлению текстовых работ для студентов дневной и заочной форм обучения направления 0907 — “Радиотехника” / В. Г. Слезкин. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 15 с.

Дополнительная литература

8. Бородич С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Критерии, условия и расчет / С.В. Бородич. — М.: Радио и связь, 1990. — 270 с.
9. Феоктистов Ю.А. Теория и методы оценки электромагнитной совместимости / Ю.А. Феоктистов, В.А. Матасов. // Под ред. Ю.А. Феоктистова — М: Радио и связь, 1988. — 215с.
10. Виноградов Е.М. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / Е.М. Виноградов, В.И. Винокуров, И.П. Харченко. — Л.: Судостроение, 1986. — 264 с.
11. Михайлов А.С. Измерение параметров ЭМС РЭС / А.С. Михайлов. — М.: Связь, 1980. — 200 с.
12. Петровский В.И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств: Учеб. пос. для вузов / В.И. Петровский, Ю.Е. Седельников. — М.: Радио и связь, 1986. — 216 с.
13. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А.Д. Князев. — М.: Радио и связь, 1984. — 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень условных обозначений

- f_p — расстройка между несущими частотами полезного и мешающего сигналов;
- f_n — частота настройки приемника;
- Δf_k — эффективная девиация частоты, приходящаяся на один телефонный канал;
- $\Delta f_{\text{пик}}$ — пиковая девиация частоты;
- $\Delta f_{\text{эфф}}$ — эффективная девиация несущей, модулированной групповым сообщением;
- F_v — верхняя частота спектра группового сигнала;
- F_{kv} — средняя частота верхнего телефонного канала в групповом сигнале;
- ΔF_k — ширина полосы частот телефонного канала;
- $\Delta f_{\text{прм}}$ — полоса пропускания приемника;
- $\Delta f_{\text{шпрм}}$ — шумовая полоса частот приемника;
- $F_{\text{мин}}$ — нижняя частота в спектре группового сигнала той группы, которая расположена по частоте ниже всех других групп;
- $\Delta P_{\text{швых}}$ — приращение псофометрической мощности шума (на выходе верхнего телефонного канала);
- $\text{Int}(z)$ — оператор определения целой части числа z ;
- $K_{\text{оп}}$ — коэффициент ослабления помехи;
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана;
- k_f — отношение шумовой полосы частот приемника к полосе его пропускания (коэффициент, учитывающий степень прямоугольности характеристики частотной избирательности приемника по основному каналу приема);
- $k_{\text{зап}}$ — коэффициент запаса, характеризующий закладываемое в параметры РРЛ уменьшение псофометрической мощности шумов в телефонном канале в точке нулевого относительного уровня по сравнению требованиями МККТТ;
- $k_{\Pi} = 0,75$ — псофометрический коэффициент (учитывает ослабление мощности шума псофометрическим фильтром, установленным на выходе телефонного канала);
- $K_{\text{пф}}$ — пик-фактор;
- L — длина (протяженность) РРЛ;
- M — число пролетов (пролетов) РРЛ;
- m — число станций РРЛ, на которых имеет место переприем по групповому спектру (демодуляция и модуляция);
- m_f — индекс частотной модуляции;
- n — число телефонных каналов в передаваемом полезном сигнале;

$n_{\text{меш}}$ — число телефонных каналов в сигнале мешающей РРЛ;

$N_{\text{ПГ}}$ — число первичных групп в составе группового сигнала;

$N_{\text{ВГ}}$ — число вторичных групп в составе группового сигнала;

$N_{\text{ТГ}}$ — число третичных групп в составе группового сигнала;

$N_{\text{гр}}$ — число групп, из которых составлен групповой сигнал;

$N_{\text{ш}}$ — коэффициент шума приемника;

$P_{\text{шнгртр}}$ — мощность переходных шумов в верхнем телефонном канале, обусловленная нелинейностью группового тракта;

$P_{\text{шнгртр}i}$ — мощность переходных шумов в верхнем телефонном канале, обусловленная нелинейностью i -го группового тракта

$P_{\text{шнф}j}$ — мощность переходных шумов (на j -м пролете РРЛ) за счет нелинейности фазочастотной характеристики высокочастотного тракта РРЛ;

$P_{\text{шнр}j}$ — мощность нелинейных переходных шумов в верхнем телефонном канале за счет рассогласования волноводного тракта j -го приемо-передающего комплекта;

$P_{\text{ш меш зап}}$ — запас по психофотметрической мощности шума на выходе телефонного канала в точке нулевого относительного уровня, который взят разработчиком линии для случая действия помех на входе приемников;

$P_{\text{ш меш вых}}$ — мощность шума на выходе телефонного канала, обусловленная действием помехи;

$P_{\text{шт вых}}$ — мощность шума на выходе телефонного канала, обусловленная тепловым шумом на входе приемника;

$P_{\text{ш доп}}$ — проектное значение психофотметрической мощности шума на выходе телефонного канала в точке нулевого относительного уровня, допустимое для всей РРЛ (в отсутствие помех);

$P_{\text{ш доп}j}$ — допустимая мощность шума в телефонном канале, приходящаяся на один (j -й) пролет РРЛ (в отсутствие помех);

$P_{\text{шт доп}j}$ — допустимая мощность теплового шума в телефонном канале, приходящаяся на один (j -й) пролет РРЛ;

$P_{\text{шт доп}}$ — допустимая мощность теплового шума на выходе телефонного канала (для всей РРЛ);

$P_{\text{шт}j}$ — мощность шума на выходе телефонного канала, обусловленная тепловым шумом на входе приёмника, работающего в j -м пролёте РРЛ;

$P_{\text{с вх прм}}$ — мощность сигнала на входе приемника;

$P_{\text{изм}}$ — мощность измерительного сигнала (1 мВт);

$P_{\text{с вых}}$ — мощность сигнала на выходе телефонного канала в точке нулевого относительного уровня (равна мощности измерительного сигнала $P_{\text{изм}}$);

$P_{\text{ш МККТТ}}$ — одноминутная средняя психофотметрическая мощность шума, ко-

торая может превышать в течение не более чем 20 % времени любого месяца;

$P_{\text{меш вх прм}}$ — мощность помехи на входе приемника (в том пролете РРЛ, который подвержен помехе);

$P_{\text{ш т вх прм}}$ — мощность теплового шума на входе приемника;

$P_{\text{меш А}}$ — значение допустимой мощности помехи, действующей на входе приемника на пролете «А» РРЛ;

$P_{\text{меш Б}}$ — значение допустимой мощности помехи, действующей на входе приемника на пролете «Б» РРЛ;

$P_{\text{меш вх прм, 4кГц}}$ — мощность мешающего сигнала на входе приемника, приходящуюся на полосу частот 4 кГц;

$P_{\text{меш вх прм}}$ — мощность мешающего сигнала на входе приемника в шумовой полосе частот приемника $\Delta f_{\text{ш прм}}$;

$P_{\text{ср}}$ — средняя мощность группового сигнала;

$P_{\text{к}} = 50 \text{ мкВт}$ — средняя мощность одиночного телефонного сообщения;

$q_{\text{дБ}}$ — отношение сигнал-помеха на входе приемника, выраженное в децибеллах;

T_0 — абсолютная температура входных цепей приемника;

$\Phi_{\Delta f}$ — плотность потока мощности, Вт/м², в полосе частот Δf ;

$\Phi_{4\text{кГц}}$ — плотность потока мощности, Вт/м², в полосе частот 4 кГц;

α — отношение средней частоты i -го телефонного канала в спектре группового модулирующего сигнала к верхней частоте спектра группового модулирующего сигнала;

$\beta_{\text{пр}}(\alpha)$ — квадрат модуля коэффициента передачи восстанавливающего контура (см. приложение А);

$\beta_{\text{пр}}(\alpha_{\text{в}})$ — значение $\beta_{\text{пр}}(\alpha)$ при $\alpha_{\text{в}} = F_{\text{кв}}/F_{\text{в}}$;

γ — отношение мощности шума на выходе приемника к мощности шума на его входе

λ — длина волны, на которой работает приемник;

θ — угол между осью диаграммы направленности антенны и направлением на источник сигнала или помехи (угловая величина, используемая как аргумент функции направленности приёмной антенны);

ϑ — промежуточный коэффициент (для расчётов);

$G_{\text{прм}}(\theta)$ — коэффициент усиления приемной антенны в направлении θ ;

Π — полоса частот, занимаемая ЧМ сигналом;

$\text{Int}(z)$ — оператор определения целой части числа z , например, $\text{Int}(24,7) = 24$;

$\text{Max}(a;b)$ — оператор нахождения наибольшего из чисел a и b .

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Частотная характеристика восстанавливающего контура

Для коррекции предискажений группового сигнала, вводимых на передающей станции перед подачей этого сигнала на модулятор передатчика, на выходе приемника включают восстанавливающий контур, который корректирует сигнал, устраняя предискажения.

На рис. Б.1. приведена частотная характеристика восстанавливающего контура, которая представляет собой зависимость квадрата модуля коэффициента передачи этого контура $\beta_{\text{пр}}$ от нормированной частоты $\alpha = F_{ki} / F_{\text{в}}$, где F_{ki} — средняя частота i -го телефонного канала в спектре группового модулирующего сигнала; $F_{\text{в}}$ — верхняя частота спектра группового сигнала.

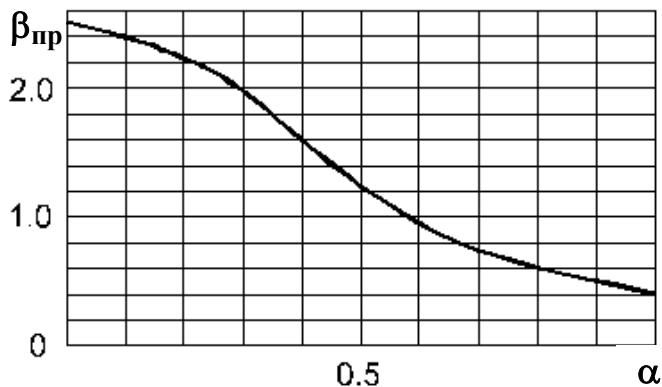


Рис. Б.1 — Частотная характеристика восстанавливающего контура

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Нормы МККТТ на психофотметрическую мощность шума в телефонном канале

В точке нулевого относительного уровня в любом телефонном канале гипотетической эталонной цепи протяженностью $L=2500$ км и $280 \text{ км} \leq L < 2500$ км психофотметрическая мощность шума должны удовлетворять нормам, приведенным в таблице В.1.

Таблица В.1 — Нормы МККТТ на психофотметрическую мощность шума в телефонном канале

№ п.п.	Наименование параметра	Протяженность РРЛ	
		$L=2500$ км	$280 \text{ км} \leq L < 2500$ км
1	Психофотметрическая мощность шума, вносимого аппаратурой уплотнения, не должна превышать, пВт	2500	
2	Средняя за любой час психофотметрическая мощность шума не должна превышать, пВт	7500	$3L$
3	Одноминутная средняя психофотметрическая мощность шума, которая может превышать в течение не более чем 20 % времени любого месяца, пВт	7500	$3L$
4	Одноминутная средняя психофотметрическая мощность шума, которая может превышать в течение не более чем 0,1 % времени любого месяца	47500	—
5	Одноминутная средняя психофотметрическая мощность шума, которая может превышать в течение не более чем в 0,1 % времени любого месяца	—	47500
6	Средняя за 5 мс невзвешенная мощность шума, которая может превышать в течение не более чем 0,01 % времени любого месяца	10^6	—

Примечание.

При расчете значения средней психофотметрической мощности шума во 2-й и 3-й строках таблицы следует в расчетные формулы подставлять значение протяженности L линии, выраженное в километрах

Заказ № _____ от “ _____ ” _____ 2007 г. Тираж _____ экз.

Изд-во СевНТУ