

6
А-59

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СВЯЗИ
им. проф. М. А. БОНЧ-БРУЕВИЧА

В. Н. ЖЕМЧУГОВ

На правах рукописи

**Исследование побочных каналов
приемника ЧМ радиосигнала**

(№ 05.291—Радиосвязь, радиовещание
и телевидение)

*Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук*

ЛЕНИНГРАД
1970

+

МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ СССР

Ленинградский электротехнический институт связи
имени проф. М.А.Бонч-Бруевича

В.Н. ЖЕМЧУТОВ

На правах
рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОБОЧНЫХ КАНАЛОВ
ПРИЁМНИКА ЧМ РАДИОСИГНАЛА

(№ 05.291 - Радиосвязь, радиовещание
и телевидение)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Л е н и н г р а д

1 - 71



Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Ленинградского электротехнического института связи имени проф. М. А. Бонч-Бруевича.

Научный руководитель — кандидат технических наук, доцент Г. К. СЕРАПИН.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор И. И. ПЕТРОВ,
- кандидат технических наук, доцент Л. П. МЕРКАДЕР.

Автореферат разослан "18" декабря 1970 г.

Защита диссертации состоится 21-го января 1971 г. на заседании объединенного Совета факультетов РТ, РК, РС и РВ Ленинградского электротехнического института связи имени проф. М. А. Бонч-Бруевича: г. Ленинград, наб. реки Мойки, дом 61, ауд. 402.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
доцент

Р. Г. ЦАТУРОВА

Быстрое развитие современного народного хозяйства требует увеличения количества и скорости передаваемой информации, что приводит к совершенствованию старых и появлению новых систем связи. Причем вновь разрабатываемые системы не должны ухудшать работоспособность уже существующих. Однако, решение этих задач с каждым годом усложняется, т.к. увеличивается нагрузка УКВ диапазона радиотехническими системами. В связи с этим в настоящее время решающее значение приобретают проблемы количественной оценки воздействия радиосистем друг на друга.

В диссертационной работе ставится задача исследования допустимой мощности радиопомех на входе преобразователя частоты приемника радиосигнала с аналоговой частотной модуляцией многоканальным сигналом. Решение поставленной задачи необходимо для определения характеристики затухания преселектора этого супергетеродинного приемника за пределами полосы пропускания и для разработки частотных планов вновь проектируемых радиосистем. Для решения поставленной задачи в диссертации пришлось:

- исследовать способы аппроксимации вольтамперных характеристик диодов, используемых для преобразователей частоты;
- разработать уточненный метод расчета токов комбинационных частот;
- провести анализ эквивалентных схем преобразователя частоты вышеупомянутого приемника.

Это позволило решить следующие задачи:

- исследовать преобразования радиосигналов и радиопомех в супергетеродинном ЧМ приёмнике;
- найти частоты побочных каналов;
- рассчитать спектры мощности помех на выходе частотного детектора (ЧД) при воздействии радиопомех на входные цепи приёмника;
- определить энергетические спектры ЧМ радиосигналов и их изменения в зависимости от загрузки системы связи телефонными каналами, поскольку от этих спектров зависит спектр мощности помех на выходе ЧД.

Основные материалы исследований изложены в четырех главах. Вспомогательные и пояснительные материалы приведены в восьми приложениях.

В главе первой дан обзор и анализ состояния вопроса по исследованию побочных каналов УКВ приёмника ЧМ радиосигнала с преобразователем частоты на полупроводниковом диоде. Этому вопросу посвящено большое количество работ и в том числе работы Соколова А.В. и *Jacobsen B. B.* Анализ упомянутых работ показал, что Соколов А.В. пользуется двухсигнальным методом для исследования побочных каналов без учёта модуляции радиосигнала и радиопомехи. Между тем из работы *Jacobsen B. B.* следует, что для исследования побочных каналов необходимо пользоваться трехсигнальным методом, учитывающим напряжения гетеродина, радиосигнала и радиопомехи. К такому же выводу приходит Ли За Сон при исследовании супергетеродинного одноканального УКВ приёмника с ламповым преобразователем частоты. Однако, *Jacobsen B. B.* не сообщает каким методом были получены его результаты. Таким образом, в диссертации приходим к выводу, что исследование побочных каналов УКВ приёмника ЧМ радиосигнала с преобразователем частоты на полупроводниковом диоде необходимо проводить, по крайней мере, 3-х сигнальным мето-

дом с учётом модуляции радиосигнала и радиопомехи, поскольку от вида модуляции зависит спектр мощности помех на выходе ЧД и частотные зоны образования побочных каналов.

Дальнейший обзор посвящен исследованиям энергетических спектров радиосигналов, модулированных по частоте многоканальным сигналом. Известно, что многоканальный сигнал по своим свойствам приближается к нормальному стационарному процессу. В опубликованных работах исследовались спектры ЧМ радиосигналов при следующих условиях:

- при нижней частоте спектра модулирующего сигнала равной нулю как без предсказаний (Гоноровский И.С., Левин Б.Р., Бородич С.В.), так и с предсказаниями (Бородич С.В.);
- при нижней частоте спектра модулирующего сигнала не равной нулю без предсказаний /спектр ЧМ радиосигнала получен из разложения соответствующей корреляционной функции в ряд Тейлора вплоть до третьего члена включительно/ (*Medhurst R. G.*);
- при нижней частоте спектра модулирующего сигнала не равной нулю с предсказаниями /спектр ЧМ радиосигнала получен из нулевого и первого членов разложения соответствующей корреляционной функции в ряд Тейлора/ (Левин Б.Р., *Middleton D., Medhurst R. G., Hamer R.*).

Между тем энергетический спектр ЧМ радиосигнала существенно зависит от нижней частоты спектра модулирующего сигнала и предсказаний. Поэтому в диссертации делается вывод о том, что необходимо исследовать спектры ЧМ радиосигналов при нижней частоте спектра модулирующего сигнала не равной нулю и с предсказаниями, получаемыми из разложения соответствующей корреляционной функции в ряд Тейлора вплоть

до третьего члена включительно.

Для устранения искажений, возникающих в элементах тракта ЧМ приёмника, между преселектором и диодным преобразователем частоты обычно включается ферритовый вентиль. В этом случае преобразователь частоты нагружен на входе на одинаковые активные сопротивления на частотах основного и зеркального каналов, что соответствует условиям широкополосного входа. Эквивалентная схема такого преобразователя частоты приведена в ранее опубликованной литературе (Torrey H.C., Whitmer C.A.) для случая приёма радиосигнала по основному или зеркальному каналам, но отсутствует для случая приёма радиопомех по побочным каналам. Поэтому в диссертации делается вывод о том, что необходимо найти эквивалентную схему преобразователя частоты с широкополосным входом при приёме радиопомех по побочным каналам.

Побочные каналы образуются токами комбинационных частот. Для определения амплитуды тока комбинационной частоты широкое распространение получила экспоненциальная функция, которая аппроксимирует вольтамперную характеристику диода, используемого для преобразования частоты. Однако эта функция не учитывает влияния сопротивления слоя полупроводника на вольтамперную характеристику диода. Поэтому данная функция пригодна для определения амплитуд токов комбинационных частот при амплитуде напряжения гетеродина меньше 0,3 в. Как правило, амплитуда этого напряжения составляет $\sim 0,5$ в. В этом случае в диссертации доказывалось, что аппроксимация экспоненциальной функцией становится недостаточно точной для расчёта токов комбинационных частот. Вследствие этого делается вывод о том, что необходимо:

- найти более точные аппроксимирующие функции, чем экспоненциальная;
- разработать 3-х сигнальный метод расчёта токов комбинационных частот.

Исследование воздействия радиопомех на частотный детектор обычно проводится для его идеализированной модели. Математический анализ этой модели выполнен для случая, когда радиопомеха на входе ЧД не зависит от радиосигнала и амплитуда радиопомехи много меньше амплитуды ЧМ радиосигнала. В этом случае спектр мощности помехи на выходе ЧД определяется свертками спектров мощности ЧМ радиосигнала и радиопомехи на входе ЧД (Смирнов В.А., Бородич С.В., Сидоров В.М., Марченко Ю.Ф., Medhurst R.G.). Между тем при исследовании преобразователя частоты 3-х сигнальным методом мгновенное значение радиопомехи на входе ЧД зависит от мгновенного значения радиосигнала. Поэтому в диссертации делается вывод о том, что необходимо уточнить спектр мощности помех на выходе ЧД с учётом нелинейных преобразований радиосигнала и радиопомехи в преобразователе частоты и частотном детекторе.

Вторая глава посвящена разработке методики расчёта величин амплитуд напряжений радиосигнала и радиопомехи на выходе преобразователя частоты с широкополосным входом. Для решения поставленной задачи сначала экспериментально исследуются вольтамперные характеристики диодов, используемых для преобразователей частоты. На основе анализа вольтамперных характеристик нескольких типов диодов установлено, что ток открытого диода по величине меньше тока закрытого диода на два порядка при условии, что отпирающие и запирающие диод напряжения не меньше 0,1в и не больше 0,8 в. Поэтому вольтамперную характеристику диода целесообразно аппроксимировать в пределах напряжений, отпирающих диод, при условии, что аппроксимирующая функция практически равна нулю для аргументов, соответствующих запирающим диод напряжениям. При достаточно малых напряжениях радиосигнала и радиопомехи на входе преобразователя частоты требуемый интервал аппроксимации вольтамперной характеристики диода равен амплитуде напряжения гетеродина.

Однако на СВЧ невозможно непосредственное измерение амплитуды этого напряжения. Поэтому в диссертации приводится методика определения амплитуды напряжения гетеродина в зависимости от постоянной составляющей тока диода при использовании аппроксимирующей функции:

$$i(V) = i_0 e^{\alpha V}, \quad (I)$$

где i_0, α - аппроксимирующие параметры, которые зависят от интервала аппроксимации. При использовании функции (I) погрешность определения амплитуды напряжения гетеродина не превышает 3%.

Анализ экспериментально снятых вольтамперных характеристик диодов показал, что для них должен быть применен метод аппроксимации по производным^{I)}. Использование этого метода позволило найти аппроксимирующие функции в виде:

$$i(V_1) = i'_0 \left[\alpha_1 V_1 \left(\arctg \alpha_1 V_1 + \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right], \quad (2)$$

$$i(V_1) = i'_0 \sqrt{\pi} \left\{ \alpha_2 V_1 [1 + \varphi(\alpha_2 V_1)] + \frac{e^{-\alpha_2^2 V_1^2}}{\sqrt{\pi}} \right\}, \quad (3)$$

где $V_1 = V - E'$,

V - напряжение, прикладываемое к диоду,

$i'_0, \alpha_1, \alpha_2, E'$ - аппроксимирующие параметры,

$\varphi(\alpha_2 V_1)$ - интеграл вероятности.

В диссертации показано, что применение любой из функций (2) и (3) приводит к среднеквадратичной ошибке аппроксимации не превышающей 2% при амплитуде напряжения гетеродина больше или равной 0,5 в. Между тем при использовании функции (I) при тех же условиях среднеквадратичная

I) А.Н.Бруевич, С.И.Евтянов. Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии. Изд. "Сов.радио", 1965.

ошибка аппроксимации составляет $\sim 10\%$.

Вторым способом, рассматриваемым в этой главе, является разработка 3-х сигнального метода расчёта амплитуд токов комбинационных частот. Используя разложение тока нелинейного сопротивления в ряд Тейлора по малым приращениям аргумента, соответствующего напряжениям радиосигнала и радиопомехи, получено следующее равенство для определения амплитуды тока комбинационной частоты^{I)}:

$$I_{mnq} = 2 \frac{1}{n!} \frac{1}{q!} \left(\frac{U_{св}}{2} \right)^n \left(\frac{U_{пв}}{2} \right)^q I_m^{(n+q)}(U_r; E_{см}), \quad (4)$$

где

$$I_m^{(n+q)}(U_r; E_{см}) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left(\frac{d i(V)}{d V^{n+q}} \right)_{V=U_r \cos \tau_r + E_{см}} \cos m \tau_r d \tau_r, \quad (5)$$

$$\tau_r = \omega_r t$$

$i(V)$ - вольтамперная характеристика диода;

m, n, q - соответственно номера гармоник частот гетеродина, радиосигнала и радиопомехи, образующих частоту радиопомехи на выходе преобразователя частоты согласно равенству:

$$\omega_{mnq} = |m\omega_r \pm n\omega_c \pm q\omega_n|,$$

$U_r, U_{св}, U_{пв}$ - соответственно амплитуды напряжений гетеродина, радиосигнала и радиопомехи, воздействующих на нелинейное сопротивление.

I) В работах В.А.Котельникова и В.И.Сифорова приводятся подобные равенства для расчёта токов комбинационных частот при воздействии двух сигналов на нелинейное сопротивление, а не 3-х сигналов. Дальнейшее обобщение приводимого здесь метода расчёта токов комбинационных частот при воздействии любого конечного числа синусоидальных напряжений нами приведены в работах [11] и [12].

Расчёт амплитуд токов комбинационных частот при использовании выражений (4) и (5) может проводиться как при помощи экспериментально снятой вольтамперной характеристики, применяя методы графических вычислений интеграла (5)¹⁾, так и при помощи аналитической аппроксимирующей функции. При этом функция $i^{(n+q)}(U_r \cos \tau_r + E_{cm})$ должна удовлетворять условиям Дирихле. Таким образом, упрощаются вычисления амплитуд токов комбинационных частот по сравнению с методом Басика И.В. Предложенный метод применен для конкретного случая аппроксимирующей функции (2). С помощью теории вычетов получены выражения для расчёта амплитуд токов комбинационных частот в замкнутом виде при любом m и $n+q \leq 3$ ²⁾.

Для другой аппроксимирующей функции (3) получены выражения в виде медленно сходящихся рядов, позволяющие определить амплитуды токов комбинационных частот.

Далее, во второй главе путём анализа ряда, используемого для расчёта токов комбинационных частот, показано, что при увеличении номера гармоники гетеродина требуется меньшая точность аппроксимации вольтамперной характеристики диода, чем при увеличении номера гармоники радиосигнала или радиопомехи.

Использование функции (2) в предложенном методе расчёта амплитуд токов комбинационных частот показывает, что амплитуда тока комбинационной частоты изменяется не монотонно в зависимости от амплитуды напряжения гетеродина и порядка комбинационного преобразования. В точках, где ам-

1) М.Г.Серебрянников. Гармонический анализ. Гостехиздат, 1948.

2) В работе А.Н.Бруевича и С.И.Евтянова. Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии. Изд. "Сов.радио", 1965; даны формулы для вычисления гармоник тока гетеродина, но не токов комбинационных частот.

плитуда тока комбинационной частоты равна нулю, функция $I_m^{(n+q)}(U_r; E_{cm})$ меняет знак, что эквивалентно сдвигу фазы на 180° в этой точке. В отличие от этого при использовании аппроксимирующей функции (1) расчётные значения амплитуд токов комбинационных частот меняются монотонно. В диссертации было проведено экспериментальное исследование законов изменения амплитуд токов комбинационных частот при частоте гетеродина равной 4,6 кГц. Измерения показали, что законы изменений амплитуд гармоник тока гетеродина $2|I_m^{(n+q)}(U_r; E_{cm})|$ как функций номеров гармоник и значений амплитуд напряжений гетеродина действительно имеют минимумы, отличающиеся от максимумов на величину большую 40 дБ. Таким образом, эксперимент подтверждает, что аппроксимирующая экспоненциальная функция не пригодна для исследования амплитуд тока высших гармоник и правильное использовать аппроксимирующую функцию (2).

В заключительной части второй главы предлагается более общая методика расчёта элементов эквивалентной схемы преобразователя частоты с широкополосным входом для случая приёма радиосигналов и радиопомех по основному и зеркальному каналам, используя выражения (4) и (5). В результате анализа уравнений преобразования частот устанавливается, что отсутствуют или пренебрежимо малы взаимные проводимости между входом и выходом преобразователя частоты с широкополосным входом при приёме радиопомех по побочным каналам. Вследствие этого входные параметры такого преобразователя частоты описываются эквивалентным четырехполюсником, а выходные эквивалентным генератором тока, нагруженным на выходную проводимость преобразователя частоты. На основании применения предложенного метода расчёта амплитуд токов комбинационных частот в данной работе приводятся значения элементов эквивалентных схем преобразователя частоты при приёме радиопомех по побочным каналам.

Приведенные в диссертации экспериментальные исследования преобразователя частоты с широкополосным входом, используемого в приёмнике РРЦ аппаратуры Р-600, показали, что значения $|I_m^{(q)}(U_r; E_{cm})|$ при $m = q = 2, 3$ имеют минимумы. Минимальные значения отличаются от максимальных на величины ~ 18 дБ и ~ 33 дБ. Сравнение значений $|I_m^{(q)}(U_r; E_{cm})|$, полученных экспериментально и теоретически, показывает, что при использовании функции (2) точность вычислений на порядок выше, чем при использовании функции (1) при условии, что постоянная составляющая тока диода равна 1,5 ма.

В третьей главе исследуются линейные и нелинейные преобразования ЧМ радиосигнала и радиопомехи в супергетеродинном приёмнике. Основной целью проведения исследований является получение равенств, описывающих мгновенные значения помех на выходе ЦД. Для этого последовательно находятся мгновенные значения радиопомехи на выходе пре- селектора, преобразователя частоты, УПЧ и ЧД. При этом пред- полагается, что используются:

- преобразователь частоты с широкополосным входом;
- широкополосный УПЧ, не искажающий радиосигнал и радио- помеху на его выходе;
- идеальный ЧД.

Исследование преобразователя частоты проводится трех- сигнальным методом. В результате проведенных исследований получено равенство, описывающее мгновенное значение фазы суммарного колебания ЧМ радиосигнала и радиопомехи на входе ЧД, если последняя тоже модулирована по частоте и на входе приёмника

$$D[k(t)] [\omega_{пч} t + \text{sign} 1 \omega_{\Delta c} x^{(-1)} + \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^{p+1} \frac{K^p(t)}{p} \sin p \psi_1(t)] +$$

$$+ \bar{D}[k(t)] [(\omega_{пч} + \Delta \omega_{пч}) t + q_6 \omega_{\Delta n} y^{(-1)} - \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^{p+1} \frac{1}{K^p(t) p} \sin p \psi_2(t)], \quad (6)$$

где $\psi_1(t) = \Delta \omega_{пч} t + n_6 \omega_{\Delta c} x^{(-1)} + q_6 \omega_{\Delta n} y^{(-1)}$,

$n_6 = n \text{ sign } n - \text{sign } 1$, $q_6 = q \text{ sign } q$,

$\text{sign } 1, n \text{ sign } n, q \text{ sign } q$ - номера и знаки номеров гармо-

ник частот радиосигнала и радиопомехи на входе преобразова- теля частоты, образующих комбинационные частоты радиопомехи и радиосигнала на выходе преобразователя частоты согласно равенствам:

$$\omega_{пч} + \Delta \omega_{пч} = m \text{ sign } m \omega_r + n \text{ sign } n \omega_c + q \text{ sign } q \omega_n, \quad (7)$$

$$\text{sign } 1 = \begin{cases} 1 & \text{при } \omega_{пч} = \omega_c - \omega_r \\ -1 & \text{при } \omega_{пч} = \omega_r - \omega_c \end{cases}, \quad (8)$$

$\Delta \omega_{пч}$ - расстройка промежуточной частоты несущей радио- помехи относительно промежуточной частоты несущей радиосигна- ла,

$$x^{(-1)} = \int_{-\infty}^t x dt,$$

x, y - модулирующие процессы ЧМ радиосигнала и радио- помехи,

$\omega_{\Delta c}, \omega_{\Delta n}$ - среднеквадратичные девиации радиосигнала и ра- диопомехи при

$$m\{x^2\} = m\{y^2\} = 1,$$

$m\{\}$ - обозначение операции вычисления математического ожидания,

$$D[k(t)] = \begin{cases} 1 & \text{при } k(t) < 1 \\ 0 & \text{при } k(t) > 1 \end{cases}, \quad (9)$$

$$\bar{D}[k(t)] = 1 - D[k(t)],$$

$K(t)$ - отношение амплитуды напряжения радиопомехи к амплитуде напряжения радиосигнала на выходе преобразователя частоты.

Анализ равенства (6) показывает, что фаза всюду непрерывна за исключением точек, где амплитуды напряжений радиосигнала и радиопомехи равны. В этих точках уравнение фазы терпит разрывы второго рода. Соответственно этому частота и сумма напряжений сигнала и помехи на выходе идеального ЧД всюду непрерывны за исключением тех же точек. В них сумма помехи и сигнала описывается дельта-функцией. Вследствие этого идеальный ЧД физически не реализуем, т.к. должен иметь бесконечную мощность. Однако реальные ЧД по своим свойствам могут очень близко приближаться к идеальному ЧД. Поэтому исследования идеального ЧД представляются интерес.

Равенство (6) позволяет рассмотреть два частных случая, представляющих практический интерес:

- при $y = 0$ получена формула для определения мгновенного значения помехи на выходе ЧД при воздействии немодулированной радиопомехи на вход супергетеродинарного приёмника;
- при $y = 0, \text{sign } l = 1, m = a = 0, n \text{ sign } n = 1$ получена формула для определения мгновенного значения помехи на выходе ЧД для любых отношений амплитуд радиопомехи и ЧМ радиосигнала на входе ЧД¹⁾.

Ввиду того, что МККР признает целесообразным исследовать применение однополосной амплитудной модуляции для систем связи с помощью активных спутников связи, в третьей

1) Ю.Ф.Марченко. Исследован воздействие радиопомехи на ЧД при условии, если амплитуда радиопомехи меньше амплитуды радиосигнала.

главе также исследовано преобразование в ЧМ приёмнике радиосигнала с ОБП, являющегося помехой для исследуемого приёмника вида:

$$\sqrt{2P_n} A(t) \cos[\omega_n t + \varphi(t)] = \sqrt{P_n} [y(t) \cos \omega_n t + \hat{y}(t) \sin \omega_n t], \quad (10)$$

где $\hat{y}(t)$ - процесс, сопряжённый по Гильберту от $y(t)$.

Вторым вопросом, рассматриваемым в третьей главе, является определение 3-х сигнальным методом номеров и знаков номеров гармоник частот гетеродина, радиопомехи и радиосигнала, образующих согласно равенству (7) побочные каналы в зависимости от частоты радиопомехи на входе преобразователя частоты и типа преобразования частоты радиосигнала /равенство (8)/. Их исследование необходимо для определения мгновенных значений помехи на выходе ЧД в зависимости от частоты радиопомехи на входе приёмника. В результате исследований найдены зоны образования побочных каналов с учётом вышеупомянутых номеров и знаков гармоник в зависимости от частоты радиопомехи на входе преобразователя частоты.

Следующим вопросом, рассматриваемым в третьей главе, является экспериментальное подтверждение необходимости учёта знаков гармоник, образующих комбинационные частоты радиосигнала и радиопомех на выходе преобразователя частоты, для определения временных значений помехи на выходе ЧД в зависимости от частоты радиопомехи на входе преобразователя частоты. Экспериментальные исследования были проведены на УКВ приёмнике в области частот ~ 30 МГц. На преобразователь частоты подавались немодулированная радиопомеха и радиосигнал, модулированный по частоте синусоидальным сигналом. Частота радиопомехи изменялась в процессе

проведения эксперимента и выбиралась равной той или иной частоте побочного канала, рассчитанной заранее. Амплитуда радиопомехи на входе ЧД устанавливалась много меньше амплитуды радиосигнала. Напряжение помехи на выходе ЧД фотографировалось с экрана осциллографа. Сопоставлением временных значений помехи, полученных расчётным путём и наблюдаемых на экране осциллографа, было показано их равенство и таким образом доказана необходимость учёта номеров и знаков номеров гармоник частот гетеродина, радиосигнала и радиопомехи, образующих комбинационные частоты радиосигнала и радиопомехи на выходе преобразователя частоты. Кроме того, при подаче радиосигнала и радиопомехи непосредственно на вход ЧД экспериментальным путём было установлено, что выражение для определения мгновенного значения сигнала и помехи на выходе идеального ЧД хорошо описывает сумму сигнала и помехи на выходе реального ЧД, за исключением области, где амплитуды радиосигнала и радиопомехи на входе ЧД отличаются менее, чем на 30%. При равенстве амплитуд радиосигнала и радиопомехи на входе идеального ЧД напряжение на выходе этого ЧД должно приобретать характер последовательности импульсов с бесконечной амплитудой, описываемых дельта-функциями. В отличие от этого помеха на выходе реального ЧД приобретает характер последовательности импульсов с конечной амплитудой, которые по форме приближаются к дельта-функциям при равенстве амплитуд радиосигнала и радиопомехи на входе ЧД. Вследствие этого возникает различие суммы сигнала и помехи на выходе идеального и реального ЧД.

Ч е т в ё р т а я г л а в а посвящена разработке методики расчёта величины допустимой мощности радиопомехи на входе преобразователя частоты приёмника ЧМ радиосигнала РРЛ. Поставленная в диссертации задача решается при условии, что мощность помехи на выходе ЧД в полосе частот телефонных каналов, вызываемая радиопомехой на входе преобразователя частоты, будет на 20 дБ меньше мощности помех, вызываемых

шумами приёмника. Для этого исследуется спектр мощности помех на выходе ЧД, определяемый путём вычисления корреляционной функции из соответствующего равенства, которое описывает мгновенное значение помехи на выходе ЧД (по материалам главы III). Спектр мощности помехи на выходе ЧД при воздействии радиопомехи на ЧМ радиоприёмник вычисляются, применяя соотношение Винера-Хинчина к этой корреляционной функции.

В связи с тем, что временные значения помехи на выходе ЧД зависят от временных значений ЧМ радиосигнала существует зависимость спектра мощности помехи на выходе ЧД от спектра мощности ЧМ радиосигнала. Поэтому другим вопросом, рассматриваемым в четвёртой главе, является уточнение спектра ЧМ радиосигнала с учётом того, что нижняя частота спектра модулирующего сигнала с предсказаниями не равна нулю. Для этого методом характеристических функций вычислена корреляционная функция ЧМ радиосигнала и получена формула для вычисления спектра мощности ЧМ радиосигнала:

$$G_{\text{ЧМ}}(P) = G_{\text{ЧМ1}}(P) + 2 \exp(-A_c^2) \delta(P), \quad (II)$$

$$\text{где } G_{\text{ЧМ1}}(P) = \exp(-A_c^2) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_c^{2m}}{m!} g_{\text{см}}(P),$$

$$g_{\text{см}}(P) = \frac{1}{2^{m-1}} \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{с3}}(P - P_2) dP_2 \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{с3}}(P_2 - P_3) dP_3 \times \dots \quad (I2)$$

$$\dots \times \int_{-\infty}^{\infty} g_{\text{с3}}(P_m) g_{\text{с3}}(P_{m-1} - P_m) dP_m,$$

$$g_{\text{с3}}(P) = \begin{cases} \left(\frac{1}{P^2} + \frac{C_2}{C_0} + \frac{C_4}{C_0} P^2 \right)^\nu & \text{при } \nu \leq P \leq 1 \\ 0 & \text{при } P < \nu, P > 1 \end{cases},$$

$$P = \frac{F}{F_{\text{с2}}}, \quad \nu = \frac{F_{\text{с1}}}{F_{\text{с2}}}, \quad A_c^2 = C_0 \frac{f_{\text{дс}}^2}{F_{\text{с2}} F_{\text{с1}}},$$

F_{c1}, F_{c2} - нижняя и верхняя частоты спектра модулирующего сигнала, $C_0 = 0,4$; $C_2 = 1,3$; $C_4 = 0,75$.

Составляющие $2 \exp(-A_c^2) \delta(\rho)$ и $G_{чмс}(p)$ соответственно определяют мощность несущей и распределенный спектр ЧМ радиосигнала. Формула (12), используемая для расчёта $G_{чмс}(p)$, состоит из суммы многократных интегралов свертки спектров мощности, которые расположены в порядке увеличения их кратности при условии, что нижняя частота спектра модулирующего сигнала не равна нулю. Полученный ряд сходится тем быстрее, чем больше мощность несущей. Анализ теоретических результатов показал, что мощность несущей больше или приблизительно равна суммарной мощности распределенного спектра радиосигнала, модулированного по частоте многоканальным сигналом, если число телефонных каналов больше 600 и нижняя частота модулирующего спектра $F_{c1} > 100$ кГц. С помощью формулы (12) вычислены спектры ЧМ радиосигналов РРЛ емкостью 960, 1800 и 2700 телефонных каналов с предсказаниями спектра модулирующего сигнала при $m \leq 3$. Анализ результатов расчёта показывает, что распределенные спектры мощности ЧМ радиосигналов на частотах, кратных верхней частоте спектра модулирующего сигнала, имеют разрывы второго рода. Это обусловлено тем, что спектр мощности модулирующего сигнала задан в конечной полосе частот.

Известно, что помеха на выходе ЧД, обусловленная интерференцией несущих ЧМ радиосигнала и радиопомехи, сосредотачивается в одном телефонном канале. Поэтому МККР рекомендовал рассеивать энергию несущей. В связи с этим другим вопросом, рассматриваемым в четвертой главе, является разработка рекомендаций по выбору оптимального варианта загрузки аппаратуры РРЛ телефонными каналами с тем, чтобы уменьшить мощность несущей. Такой вариант определен в результате исследований изменений мощности несущей ЧМ радиосигнала. Этот вариант соответствует полной загрузке сигналами нижних

по частоте телефонных каналов в спектре многоканального модулирующего сигнала. Изменение загрузки РРЛ работающими телефонными каналами осуществляется путём выключения и подключения сигналов верхних по частоте телефонных каналов.

В четвертой главе вычислены корреляционные функции и спектры мощности помех на выходе ЧД при воздействии на вход УКВ супергетеродинажного приёмника ЧМ радиосигнала и радиопомех; с частотной модуляцией, немодулированной и с однополосной амплитудной модуляцией. Полученные результаты найдены для случая, когда амплитуда радиопомехи на входе ЧД меньше амплитуды радиосигнала. При этом установлено, что спектральная плотность мощности помех на выходе ЧД в общем случае не определяется свертками спектров мощности радиосигнала и радиопомехи на его входе, т.к. радиопомеха на входе ЧД может быть функционально связана с сигналом. Исключение составляет случай, когда в комбинационном преобразовании радиопомехи не участвует гармоника частоты радиосигнала ($n = 0$). Полученные выражения использованы для расчёта допустимой мощности радиопомех на входе преобразователя частоты приёмника ЧМ радиосигнала РРЛ емкостью 600, 1800 и 2700 телефонных каналов.

В работе вычислены корреляционная функция и спектр мощности помех на выходе идеального ЧД при действии на его входе прямоугольной периодической радиоимпульсной помехи для любых отношений амплитуд радиопомехи к радиосигналу. При этом было использовано разложение дельта-функции, входящей в выражение для определения мгновенного значения помехи, в тригонометрический ряд. Рассчитана мощность помех в телефонных каналах РРЛ аппаратуры Р-600 при изменении отношений амплитуд радиоимпульсной помехи к радиосигналу в пределах от 0,1 до 10. Анализ теоретических результатов показывает, что при воздействии вышеупомянутой помехи пороговые свойства идеального ЧД появляются скачком, если отношение амплитуды радиопомехи к амплитуде радиосигнала

становится больше I. При этом мощность помех на выходе нижних телефонных каналов в спектре многоканального сигнала может оказаться больше, чем для верхних телефонных каналов.

З а к л ю ч е н и е

Кратко перечислим основные результаты, полученные в данной работе.

I. На основании анализа работ предшествующих авторов изложено современное состояние теории по исследованию побочных каналов приёмника ЧМ радиосигнала и основные нерешенные проблемы, имеющие практический интерес. К ним относятся:

- выбор функций более точно аппроксимирующих вольтамперные характеристики диодов, чем экспоненциальная;
- разработка методов расчёта токов комбинационных частот;
- определение зон образования побочных каналов трехсигнальным методом;
- исследование преобразований сигналов и помех в супергетеродинном приёмнике;
- расчёт спектров мощности ЧМ радиосигналов при нижней частоте спектра модулирующего сигнала не равной нулю и с предсказаниями;
- исследование спектров мощности помех на выходе частотного детектора.

2. Предложен метод разложения тока нелинейного сопротивления в ряд Тейлора по малым приращениям напряжений /выражения (4), (5)/, необходимый для исследований амплитуд токов комбинационных частот на выходе преобразователя частоты. С помощью этого метода и выражения (2) получены соотношения для определения амплитуд токов

комбинационных частот при $n+q \leq 3$ и любом m .

3. Разработан графоаналитический метод определения границ аппроксимации вольтамперных характеристик диодов, используемых для преобразователей частоты, в зависимости от постоянных составляющих тока последних.

4. Установлено, что для вольтамперных характеристик диодов целесообразно использовать метод аппроксимации их по производным. На основании упомянутого метода вычислены функции, которые могут быть применены для этих целей.

5. Найдены частоты побочных каналов трехсигнальным методом, учитывающим номера и знаки номеров гармоник частот: гетеродина, радиосигнала и радиопомехи, образующими частоту радиопомехи на выходе преобразователя частоты.

6. Исследованы эквивалентные схемы преобразователя частоты с широкополосным входом для случая приёма радиопомех по побочным каналам. Элементы эквивалентных схем определены методом расчёта амплитуд токов комбинационных частот, упомянутым в п.2.

7. Экспериментальными и теоретическими путями установлено, что временные значения помехи на выходе ЧД зависят от номеров и знаков номеров гармоник радиосигнала и радиопомехи, образующих комбинационные частоты радиосигнала и радиопомехи на выходе преобразователя частоты.

8. Получены выражения (II) и (I2) для определения спектров мощности ЧМ радиосигнала при нижней частоте спектра модулирующего сигнала не равной нулю и с предсказаниями. Рассчитаны спектры мощности ЧМ радиосиг-

налов РРЛ емкостью 960, 1800 и 2700 телефонных каналов. Рекомендован оптимальный вариант загрузки РРЛ телефонными каналами.

9. Вычислены корреляционные функции и спектры мощности помех на выходе ЧД при воздействии радиопомех на вход супергетеродинного приёмника ЧМ радиосигнала. При этом установлено, что вид спектра мощности помех на выходе ЧД зависит как от номеров, так и от знаков номеров гармоник частот радиосигнала и радиопомехи, образующих комбинационные частоты радиосигнала и радиопомехи на выходе преобразователя частоты.

10. В результате проведенных исследований побочных каналов в диссертации разработаны инженерные методы расчёта допустимой мощности радиопомех на входе преобразователя частоты приёмника ЧМ радиосигнала. Материалы исследований позволили выполнить эти расчёты для аппаратуры РРЛ емкостью 600, 1800 и 2700 телефонных каналов.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. В.Н. Жемчугов. Расчёт мощности несущей ЧМ колебаний в радиорелейных системах. Труды НТК ЛЭИС, вып. I, 1966.
2. В.Н. Жемчугов. К вопросу определения помех для телефонной РРЛ при действии импульсной помехи. Материалы юбилейной научно-технической конференции ЛЭИС, вып. I, 1967.
3. В.Н. Жемчугов. К вопросу определения мощности помех для телевизионной РРЛ. Материалы юбилейной научно-технической конференции ЛЭИС, вып. I, 1967.

4. В.Н. Жемчугов. Определение мгновенного значения частотномодулированной помехи на выходе частотного детектора. Материалы научно-технической конференции ЛЭИС, вып. I и 2, 1968.
5. В.Н. Жемчугов. Расчёт спектра мощности помех на выходе частотного детектора приёмника РРЛ. Материалы научно-технической конференции ЛЭИС, вып. I и 2, 1968.
6. В.Н. Жемчугов. К вопросу определения спектра мощности частотномодулированных колебаний на РРЛ. Труды учебных институтов связи, вып. 42, 1968.
7. В.Н. Жемчугов. К вопросу расчёта продуктов комбинационных преобразований. Материалы научно-технической конференции ЛЭИС, 1969.
8. В.Н. Жемчугов. Исследование помех на радиорелейных линиях, возникающих при преобразовании частот. Тезисы докладов XXIV областной научно-технической конференции, посвященной Дню радио и дню радиста. Ленинград, 1969.
9. В.Н. Жемчугов. Исследование допустимой мощности ЧМ помех на входе преобразователя частоты приёмника ЧМ сигнала. Материалы научно-технической конференции ЛЭИС, 1970.
10. В.Н. Жемчугов. Определение мощности помех на выходе частотного детектора при действии радиопомех. Труды учебных институтов связи, вып. 52, 1970.
11. В.Н. Жемчугов, Ю.В. Марков. Исследование комбинационных токов на выходе преобразователя частоты. Труды учебных институтов связи, вып. 53, 1971 (в печати).