

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра систем информационной безопасности

**ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВОГО  
И ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ  
ОДНОПОЛОСНОГО РАДИОСИГНАЛА.  
ЧАСТЬ 1**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторной работы для студентов направления  
11.04.01 «Радиотехника» (профиль «Защита информации в каналах  
связи») и специальности 10.05.01 «Радиоэлектронные системы  
и комплексы» очной формы обучения

Воронеж 2020

УДК621.396.61

ББК 32.848я7

**Составитель** канд. техн. наук М. И. Бочаров

**Исследование аналогового и цифрового формирователей однополосного радиосигналов. Часть 1:** методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов направления 11.04.01 «Радиотехника» (профиль «Защита информации в каналах связи») и специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: М. И. Бочаров. Воронеж, 2020. – 27 с.

В работе содержатся краткие теоретические сведения о методах построения формирователей радиосигналов с однополосной модуляцией (ОМ), структурные и типовые принципиальные схемы формирователей ОМ сигналов, а также домашнее и лабораторное задания, методические указания для их выполнения и контрольные вопросы по дисциплине «Устройства генерирования и формирования радиосигналов».

Предназначено для магистров первого курса и студентов третьего курса очной формы обучения.

Ил. 3. Табл. 4. Библиогр.: 7 назв.

**Рецензент** – д-р техн. наук, проф. А. В. Останков

*Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета*

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

В дисциплине «Устройства генерирования и формирования радиосигналов» рассматриваются формирователи радиосигналов различного назначения, в частности с ОМ, являющейся одним из наиболее эффективных видов модуляции, используемых как в аналоговых, так и в цифровых системах связи.

Содержание дисциплины базируется на материалах, изучаемых в курсах «Основы теории цепей», «Радиотехнические цепи и сигналы», «Схемотехника аналоговых электронных устройств» и «Микропроцессоры и цифровые устройства». В лабораторной работе изучаются методы построения ОМ формирователей радиосигналов, функциональные и структурные схемы их реализации, основным из которых является фильтровой или метод повторной балансной модуляции.

В ходе работы исследуются основные характеристики формирователя ОМ сигнала, построенного по фильтровому методу: амплитудная характеристика, временные и спектральные характеристики выходных сигналов и временные с использованием электронного моделирования в системе MicroCAP, а также экспериментальную проверку и оценку полученных результатов.

### **1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАБОТЕ**

1.1. Исследование проводится путем электронного моделирования с использованием системы моделирования MicroCAP и ее программного обеспечения, а также проведения экспериментальных исследований на лабораторной установке с применением измерительной аппаратуры: генератора сигналов низкочастотного, высокочастотного

вольтметра электронного осциллографа, электронно-счетного частотомера, селективного микровольтметра.

## 2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

2.1. Изучить принципы построения формирователей ОМ сигналов и привести соответствующие обоснования с помощью функциональных схем модуляторов, построенных по фильтровому, фазокомпенсационному и фазофильтровому методам.

2.2. Нарисовать спектры сигналов на выходе балансных модуляторов (БМ).

2.2.1. На выходе идеального БМ по исходным данным, приведенным в табл. 1, и одночастотном управляющем сигнале.

Таблица 1

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Упр. частота $F$ , кГц	3.0	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0	6.0	6.0
Частота $f_0$ , МГц	0,5	1,0	2.0	4.0	5.0	10.0	20.0	30.0

2.2.2. На выходе идеального кольцевого балансного модулятора (КБМ) при идентичности вольтамперных характеристик полупроводниковых диодов (ПД) и параметров других элементов плеч модулятора и при одночастотном управляющем сигнале.

Исходные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер варианта	9	10	11	12	13	14	15	16
Упр. частота $F$ , кГц	2.5	2.5	2.5	2.75	3.25	3.0	2.75	3.5
Частота $f_0$ , МГц	0.75	1.5	3.0	6.0	12.0	24.0	32.0	36.0

2.2.3. Изучить методику построения спектра радиосигнала на выходе формирователя ОМ сигнала: варианты 1 – 8: выделяются нижние боковые частоты (полосы частот); варианты 9 – 16: выделяются верхние боковые частоты (полосы частот).

2.3. Изучить методику подготовки исходных данных для электронного моделирования в системе MicroCAP и составления электронной схемы.

2.3.1. Выполнить электрический расчет схемы диодного БМ или диодного КБМ (в зависимости от варианта домашнего задания) и уяснить особенности минимизации побочных составляющих спектра выходного сигнала. Для этого необходимо воспользоваться источниками.

2.3.2. Изучить методику исследования электрических характеристик БМ модуляторов и реализовать ее на диодных модуляторах при электронном моделировании в среде MicroCAP:

- временных зависимостей токов, протекающих через ПД и напряжений на полуобмотках первичной обмотки второго трансформатора и на нагрузке;

- спектра выходных токов и напряжений характерных точках исследуемых схем;

- полученные зависимости зафиксировать в одном из форматов (.jpg, .png, .tiff).

2.4. Ознакомиться с методикой экспериментальных исследований амплитудной и амплитудно-частотной характеристик формирователей ОМ сигналов.

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ**

3.1. При выполнении п. 2.1. домашнего задания необходимо: изучить методы формирования ОМ сигнала, изложенные в [1-3] и прил. 1.

При этом следует уяснить какое влияние оказывают фазовые соотношения между гармониками воздействующих на ПД сигналов на работу устройства и каким образом происходит подавление несущих (поднесущих) частот, их гармоник, а также части комбинационных составляющих, возникающих за счет нелинейности ВАХ диодов. Уяснить и особенность уменьшения комбинационных составляющих, которые определяют уровень нелинейных искажений на выходе БМ и выбрать оптимальный режим работы ПД.

3.2. При выполнении п.2.2.2. необходимо также определить спектральный состав выходного тока КБМ (аналогично п.2.2.1) и уяснить отличительные особенности выходного тока КБМ от токов БМ. Обосновать требования к полосовым фильтрам для подавления неиспользуемой боковой на 40 дБ и более, а также требования к ПД, трансформаторам и блокировочным конденсаторам.

Для определения конкретных значений крутизны затухания полосовых фильтров необходимо воспользоваться управляющим сигналом с полосой 0.3-3.4 кГц [3] и значениями несущих частот  $f_0$ , приведенными в табл.1 и табл.2 (для заданного варианта), выполнить расчет крутизны затухания полосовых фильтров.

Пояснить: какой из вариантов реализации БМ более предпочтителен: на ПД (пассивные схемы) или на транзисторах (дифференциальных каскадах).

3.3. При выполнении п.2.3.1 и п.2.3.2 необходимо выполнить электрический расчет принципиальных электрических схем в соответствии с [4,5] и в приложении 2.

На основании полученных результатов необходимо составить электрическую схему для электронного моделирования с учетом рекомендаций, приведенных в [6].

3.4. Методика исследования амплитудной характеристики заключается в определении уровней боковых частот радиосигнала на выходе БМ от амплитуды управляющего

сигнала. Методика исследования амплитудно-частотной характеристики БМ вытекает из определения сути амплитудно-частотной характеристики.

#### 4. ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

4.1. Выполнить электронное моделирование заданной схемы БМ в среде MicroCap. Для этой цели необходимо создать электронную модель исследуемого БМ в соответствии с техническими условиями на моделирование.

4.2. Сформировать временные зависимости токов, протекающих через первичную обмотку трансформатора T2 и напряжений на полуобмотках, а также форму напряжения на нагрузке (резисторе R1).

Зафиксировать формы токов, протекающих через каждое плечо БМ и напряжений на нагрузке: соответствующие

- линейному режиму работы модулятора;
- нелинейному режиму работы модулятора.

Контроль режима работы модулятора осуществлять качественно по форме напряжения на выходе БМ1 (резисторе R1). Появление нелинейных искажений определяется по уплощению выходного сигнала на выходе БМ

4.3. Снять зависимости спектра токов, протекающих через каждое плечо исследуемого БМ, а также напряжения на выходе ОМ (резисторе R1). Привести графики сформированных спектров:

- для линейного режима работы ОМ;
- для нелинейного режима работы ОМ.

С использованием полученных зависимостей определить уровень комбинационных составляющих с частотами  $f_0 \pm F$ ,  $f_0 \pm 3F$ .

Определить величину нелинейных искажений с использованием соотношений (1). Полученные результаты занести в отчет.

$$K_4 = 20 \cdot \log(U_{f,3F}/U_{f,F}), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где  $U_{f,F}$ -амплитуды напряжения комбинационных составляющих с частотами  $f_0 \pm F$ ;  $U_{f,2F}$ - амплитуды напряжения комбинационных составляющих с частотами  $f_0 \pm 2F$ ;  $U_{f,3F}$ - амплитуды напряжения комбинационных составляющих с частотами  $f_0 \pm 3F$ ).

#### 4.4. Экспериментальные исследования формирователя ОМ сигнала.

1. Ознакомиться с описанием лабораторной установки, назначением органов ее управления, используемой измерительной аппаратурой на рабочем месте и ее техническими характеристиками (прил. 3). В отчете привести перечень необходимых для исследования приборов и их основные технические характеристики.

2. Снять амплитудную характеристику  $U_{\text{вых}} = \Psi(U_F)$  балансного модулятора.

К гнездам «Вход» лабораторной установки подключить генератор сигналов низкочастотный а к ее выходным зажимам высокочастотный вольтметр. Изменяя амплитуду напряжения на выходе низкочастотного генератора  $U_F$  от 0 до 150 мВ с шагом приблизительно 10-30 мВ и в табл.3 соответствующие значения выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ .

Таблица 3

$U_F, \text{ мВ}$							
$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$							

По полученным результатам построить график зависимости выходного напряжения формирователя от амплитуды входного напряжения; определить также и максимальную амплитуду  $U_{Fmax}$ , при которой сохраняется линейный режим работы формирователя.

3. Исследовать форму выходного колебания на выходе первого балансного модулятора.

К гнездам XS1 лабораторной установки подключить осциллограф.

Установить амплитуду сигнала на выходе низкочастотного генератора равной  $0.4U_{Fmax1}$  частоты  $F=1000$  Гц.

Зафиксировать форму колебаний, наблюдаемых на экране осциллографа.

4. Установить амплитуду сигнала на выходе низкочастотного генератора равной  $U_{Fmax1}$ , при которой выходной сигнал искажен. Зарисовать форму колебаний, наблюдаемых на экране осциллографа в этом случае.

По полученным временным диаграммам оценить: качественно наличие (отсутствие) нелинейных искажений на выходе БМ по отличию формы огибающей сигнала от синусоидальной.

5. Определить уровень нелинейных искажений на выходе БМ с помощью селективного микро-вольтметра (анализатора спектра).

Подключить селективный микро-вольтметр к выходу БМ1; далее при выключенном напряжении питания низкочастотного генератора путем вращения ручки «Настойка» селективного микровольтметра настроить вольтметр на остаток частоты  $f_0$  и зафиксировать его значение на шкале вольтметра по возрастанию уровня сигнала на его выходе и занести полученное значение в отчет.

Установить амплитуду сигнала на выходе низкочастотного генератора  $U_F=0.4U_{Fmax1}$  с частотой  $F=10$  кГц (выбор значения частоты  $F$  определяется селективностью

используемого микровольтметра). И изменяя настройку селективного микровольтметра сначала влево, а затем вправо (или наоборот) относительно первоначально зафиксированного ранее на шкале значения частоты  $f_0$ :

- зафиксировать уровни спектральных составляющих с комбинационными частотами  $f_0$ ;  $f_0 \pm F$ ;  $f_0 \pm 3F$ ;

- с использованием соотношения (1) и определить уровни нелинейных искажений по комбинационным составляющим.

6. Снять амплитудно-частотную характеристики формирователя  $a_{\phi} = \phi(F)$ .

К выходным гнездам формирователя ОМ сигнала подключить высокочастотный вольтметр. На вход формирователя с низкочастотного генератора сигналов подать модулирующий сигнал  $U_F = 0.5 \cdot U_{Fmax1}$ . Изменяя его частоту в пределах от 50 Гц до 4000 Гц и поддерживая амплитуду сигнала  $U_F = 0.5 \cdot U_{Fmax1}$  постоянной, измерить амплитуду выходного сигнала в заданном диапазоне частот в 8..10 точках. Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 4

F, Гц							
$U_{\text{вых}}, \text{В}$							
$a_{\phi}, \text{дБ}$							

По полученным результатам рассчитать нормированную АЧХ формирователя с использованием соотношения:

$$a_{\phi} = 20 \cdot \lg(U_{\text{вых}}/U_{\text{вых0}}), \quad (2)$$

где  $U_{\text{вых0}}$ -амплитуда напряжения на выходе формирователя, измеренная на частоте  $F=1000$  Гц.

По результатам исследований в п.4:

– построить график зависимости АЧХ от частоты (график АЧХ по оси частот приводить в логарифметрическом масштабе);

– определить полосу пропускания формирователя по уровню  $\Delta a_{\phi}=3$  дБ.

## 5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Зависимости полученные в процессе электронного моделирования:

Временные диаграммы выходного напряжения, соответствующие: а) линейному режиму работы БМ или КБМ; б) нелинейному режиму работы БМ или КБМ.

2. Структурную схему исследуемого формирователя ОМ сигнала.

3. Результаты расчетов выполненных в соответствии п. 3.2, 3.3 и 3.4 домашнего задания.

4. Результаты электронного моделирования балансного модулятора в системе MicroCap.

5. Таблицы и графики экспериментальных исследований, а также результаты обработки полученных результатов.

6. Краткие выводы по проделанной работе, содержащие сопоставление результатов расчета, моделирования и эксперимента, а также анализ полученных результатов по каждому выполненному пункту лабораторного задания.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

А. Вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы.

6.1. Запишите уравнение ОМ сигнала при модуляции

несущей одним тоном (частотой). Поясните: в каких параметрах ОМ радиосигнала заложена информация о модулирующем сигнале (амплитуде и частоте)?

6.2. Назовите особенности радиосигнала с ОМ.

6.3. Сформулируйте сущность методов формирования ОМ сигнала и приведите их типовые структурные схемы для их реализации.

6.4. Нарисуйте принципиальную схему диодного БМ. Поясните принцип ее работы. Приведите и спектр выходного сигнала идеального БМ; реального БМ?

6.5. Приведите принципиальную схему кольцевого БМ и поясните принцип ее работы для случаев: идеального КБМ и реального КБМ.

6.6. Как реализовать перемножитель сигналов, выполненный на КБМ с использованием полупроводниковых диодов? Какой при этом формируется спектр на его выходе?

6.7. Поясните сущность фильтрового метода формирования ОМ сигнала.

6.8. Почему при фильтровом методе формирования ОМ сигнала в диапазонах ВЧ и выше используется повторная балансная модуляция с применением двух и более ступеней преобразования спектра?

6.9. Почему на выходе модулятора первой ступени двухступенчатого формирователя ОМ сигнала используются высокоизбирательные кварцевые или полосовые фильтры другого типа, имеющие АЧХ, близкую к прямоугольной?

6.10. Что такое амплитудная характеристика БМ? Как экспериментально снимается амплитудная характеристика БМ?

6.11. Каким образом с помощью селективного вольтметра можно определить нелинейные искажения, возникающие в ОМ?

6.12. Как с помощью осциллографа можно определить нелинейные искажения?

6.13. Как определить линейный режим работы модулятора?

6.14. Как экспериментально снимается амплитудно-частотная характеристика фильтра?

6.15. Как по частотно-динамической характеристике определить полосу рабочих частот и уровень частотных искажений?

Б. Вопросы для защиты лабораторной работы

6.15. Нарисуйте спектр сигнала на выходе реального балансного (кольцевого) модулятора.

6.16. В чем состоит отличие спектра балансного модулятора от спектра на выходе простейшей схемы (на одном нелинейном элементе)?

6.17. Какое устройство называют аналоговым перемножителем сигналов?

6.18. Поясните принцип работы аналогового перемножителя, выполненного на дифференциальном каскаде.

6.19. Какие преимущества активных (транзисторных) перемножителей по сравнению со схемами на пассивных элементах (диодах)?

6.20. Почему в первой ступени преобразователя спектра однополосного формирователя БМ (перемножитель) должен иметь более высокую линейность модуляционной характеристики по сравнению с последующими ступенями?

6.21. Какой из генераторов поднесущих частот двухступенчатого ОМ модулятора должен иметь большую стабильность частоты?

6.22. К чему может привести нестабильность второй поднесущей частоты (в случае ее использования при формировании ОМ сигнала)?

6.23. Поясните сущность двухтонового метода измерения нелинейных искажений на выходе усилителя.

6.24. Какие преимущества цифрового метода формирования ОМ сигнала по сравнению с аналоговым?

6.25. Какие преимущества аналоговых методов формирования ОМ сигнала перед цифровыми?

6.26. Почему при экспериментальных исследованиях на выходе БМ1 остается остаток несущей частоты  $f_0$ ?

6.27. Какое отрицательное влияние остатка не полностью подавленной несущей частоты  $f_0$  (В.6.26) на работу модулятора (системы связи)?

6.28. Какой положительный эффект достигается за счет использования остатка несущей частоты  $f_0$  при проведении экспериментальных исследований?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ворона, В.А. Радиопередающие устройства. Основы теории расчета: учеб. пособие / В.А. Ворона – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 384 с.
2. Петров, Б.Е. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах: учеб. пособие / Б.Е. Петров, В.А. Романюк. – М.: Высш.шк., 1989. – 232 с.
3. Радиопередающие устройства: учебник для вузов / В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др.; под ред. В.В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.
4. Проектирование радиопередатчиков / В.В. Шахгильдян, В.Б. Козырев, А.А. Ляховкин и др.; под ред. В.В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь, 2000. – 654 с.
5. Бочаров, М.И. Формирование радиосигналов. Часть 1. Аналоговые виды модуляции: учеб. пособие / М.И. Бочаров.- Воронеж: ВГТУ, 2010.
6. Разевиг, В.Д. Схемотехническое моделирование с помощью MicroCap. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 368 с.
7. ГОСТ 22579-86 Радиостанции с однополосной модуляцией сухопутной подвижной службы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ О ОДНОПОЛОСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Известно [1- 3], что спектр колебания с амплитудной модуляцией при гармоническом модулирующем сигнале определяется тремя составляющими

$$i_{ам}(t)=I_m \cdot \cos(\omega_0 t)+0.5 \cdot m \cdot I_m \cdot \cos(\omega_0-\Omega)t+0.5 \cdot m \cdot I_m \cdot \cos(\omega_0+\Omega)t, \quad (\text{П.1.1})$$

где  $I_m$  - амплитуда тока в режиме молчания (телефонный режим работы);  $m$  - коэффициент модуляции;  $\omega_0=2 \cdot \pi \cdot f_0$ ,  $\Omega=2 \cdot \pi \cdot F$ .

Для получения однополосной модуляции в спектре АМ подавляют несущую и одну боковую частоту, поэтому спектр ОМ колебания содержит одну боковую частоту, а его спектр определяется уравнением

$$i_{ом}(t)=m \cdot I_m \cdot \cos(\omega_0 \pm \Omega)t, \quad (\text{П.1.2})$$

В выражении (П.1.2) знак «+» соответствует выделению верхней боковой частоты, а знак «-» – выделению нижней боковой частоты.

Уравнения (П.1.2) содержат информацию о передаваемом сигнале, т.е. о значении его амплитуды  $U_{\Omega}$  и частоты  $\Omega$ . При этом информация об амплитуде содержится в амплитуде боковой, так как она пропорциональна амплитуде управляющего сигнала (пропорциональна  $m$ ), а информация о частоте модулирующего сигнала  $\Omega$  содержится в разности между боковыми частотами  $\omega_0 \pm \Omega$  и частотой несущего колебания  $\omega_0$ . Необходимости в излучении колебания частоты  $\omega_0$  нет, поскольку ее значение в канале связи заранее определено, а в

радиоприемнике эта частота восстанавливается автономным источником ВЧ колебаний (гетеродином).

В случае сложного (звукового) управляющего сигнала спектр ОМ колебания представляет собой сдвинутый по частоте спектр звукового сигнала. При этом в области более высоких частот выделяется либо нижняя боковая, либо верхняя боковая частота спектра. В процессе модуляции изменяются как амплитуда, так и фазовый угол РЧ колебания. Поэтому однополосная модуляция является амплитудно-фазовой (частотной) модуляцией.

При модуляции полосой информационных частот спектр ОМ сигнала по ширине равен спектру исходного модулирующего сигнала  $a$ , по сравнению со спектром АМ, в два раза уже. При равенстве пиковых мощностей сигналов с однополосной и амплитудной модуляцией ( $m=1$ ), условия малого уровня флуктуационных помех и линейном детектировании, однополосная модуляция по сравнению с АМ в диапазоне ВЧ обеспечивает энергетический выигрыш около 16 (12 дБ). В реальном телефонном канале преимущество значительно выше, поскольку среднее значение коэффициента модуляции составляет 0.3- 0.4.

Используются следующие методы формирования ОМ сигнала: фильтровой, фазокомпенсационный и фазофильтровой.

Сущность фильтрового метода состоит в преобразовании сигнала тональных частот в двухполосный сигнал (без несущей частоты) с помощью балансного модулятора и последующим выделением необходимой боковой полосы (нижней или верхней) с помощью полосового фильтра (ПФ). При этом полоса пропускания ПФ выбирается таким образом, чтобы выделить составляющие либо только одной верхней, либо только одной нижней боковых полос.

БМ имеют два основных преимущества перед простейшими (однотактными) схемами: подавляют несущую частоту и

уменьшают уровень комбинационных частот (нелинейных искажений), а именно компенсируют комбинационные составляющие нечетного порядка:  $\omega_0 \pm 2\Omega$ ,  $\omega_0 \pm 4\Omega$  и т.д., что позволяет реализовать современные требования ГОСТ [7] по уровню нелинейных искажений и стабильности частоты.

По структурным признакам всё многообразие балансных схем можно разделить на балансные (последовательные, параллельные и мостовые), а также кольцевые (двойные балансные). Каждую из этих схем можно выполнить как на пассивных, так и на активных элементах, выполняющих роль нелинейного элемента.

Преимущество пассивных схем – большая линейность модуляционных характеристик, что позволяет реализовывать уровень комбинационных составляющих  $a_n = 20 \cdot \lg(U_{f \pm 3F} / U_{f \pm F})$  ниже -50 дБ. Однако диодные БМ вносят достаточно большое затухание в цепь информационного сигнала.

Активные БМ [4] обеспечивают небольшое усиление полезного сигнала, но уровень комбинационных составляющих в них выше, чем в диодных схемах, что усложняет реализации требований ГОСТ по уровню допустимых нелинейных искажений. Необходимо также отметить, что диодные схемы являются более высокочастотными по сравнению с транзисторными.

Следует отметить, что высокие качественные показатели БМ можно достигнуть при условии высокой симметрии плеч БМ и идентичности параметров нелинейных элементов. Последнее обеспечивается применением диодных и транзисторных сборок, выполненных по интегральной технологии, а также при интегральном выполнении активных БМ, включающих и цепи коррекции.

Рассматривая выходной сигнал как результат выполнения математической операции, можно отметить, что БМ выполняет операцию умножения.

Рассмотрим принцип работы диодного БМ [3,4] (см. рисунок).

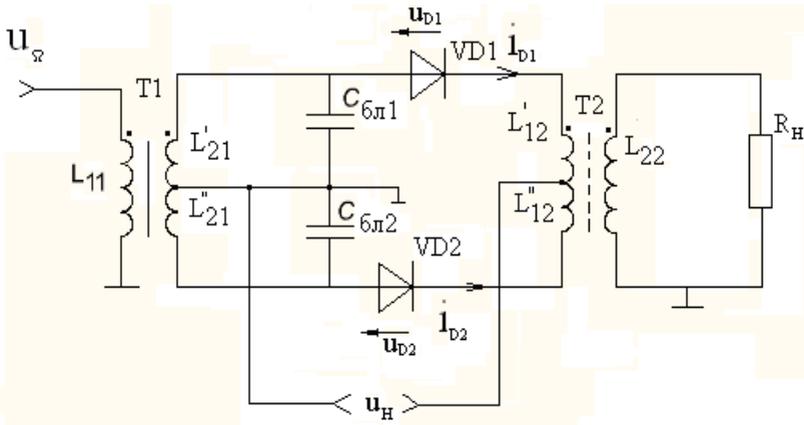


Рис. П.1.1. Принципиальная схема диодного БМ

В этой схеме к аноду VD1 приложено напряжение

$$u_{D1} = U_{\Omega} \cos \Omega t + U_H \cos \omega_0 t, \quad (\text{П.1.3})$$

а ко второму диоду

$$u_{D2} = -U_{\Omega} \cos \Omega t + U_H \cos \omega_0 t, \quad (\text{П.1.4})$$

Из (П.1.3) и (П.1.4) следует, что модулирующее напряжение приложено к диодам VD1 и VD2 в противофазе, а напряжение несущей синфазно, поскольку диоды VD1 и VD2 включены по двухтактной схеме.

В общем случае спектры амплитуд тока, протекающего через каждый из диодов, определяется как составляющие ряда Фурье известным методом, а значения частот определяются выражением

$$n\omega_0 \pm m\Omega, \quad (\text{П.1.5})$$

где  $n = 1, 2, 3 \dots$ ;  $m = 1, 2, 3 \dots$  - целые числа.

Как следует из (П.1.5), токи  $i_{д1}$  и  $i_{д2}$  содержат спектр, состоящий из большого числа следующих составляющих: частоты  $\Omega$  и её гармоник; частоты  $\omega_0$  и её гармоник; комбинационных составляющих частот  $\omega_0$  и  $\Omega$ .

При преобразовании частот происходит также и преобразование начальных фаз спектральных составляющих. При этом с учетом того, что начальные фазы управляющего и несущего напряжений первого диода VD1 равны нулю (П.1.3), результирующие начальные фазы всех образовавшихся составляющих тока  $i_{д1}$  также равны нулю.

Начальная фаза управляющего напряжения приложенного к VD2, как следует из (П.1.4)  $\Phi_1 = \pi$ . Поэтому начальные фазы комбинационных спектральных составляющих тока  $i_{д2}$ , образовавшихся при преобразовании частоты, изменяются и определяются соотношением

$$\Phi_m = m\pi, \quad (\text{П.1.6})$$

где  $m = 1, 2, 3$  и т.д.

Амплитуды спектральной составляющей тока  $i'_{\Sigma}$  протекающего через вторичную обмотку T2 с учетом изложенного выше определяется выражением

$$i'_{\Sigma} = I_m \{ (1/k) \cos \Omega t + (1/\pi) \sin(\pi/k) [\cos(\omega_0 + \Omega)t - \cos(\omega_0 - \Omega)t] + (1/2\pi) [\cos(\omega_0 + 3\Omega)t - \cos(\omega_0 - 3\Omega)t] + \dots \}, \quad (\text{П.1.7})$$

где  $I_m$  – величина импульса тока;  $k = T/\tau_0$  – скважность;  $T$  – период несущего колебания;  $\tau_0$  – длительность импульсов тока.

В выражении (П.1.7) как известно полезную информацию несут составляющие  $\omega_0 \pm \Omega$ . Остальные комбинационные составляющие с нечётными  $m = 3, 5 \dots$  являются искажениями.

Таким образом, спектр выходного тока БМ (см. рисунок) содержит частоту  $\Omega$  и её гармоники, информационные составляющие  $\omega_0 \pm \Omega$ , а также составляющие  $\omega_0 \pm 3\Omega$ ,  $\omega_0 \pm 5\Omega$  и т.д., создающими нелинейные искажения.

Условием достижения малого уровня нелинейных искажений является малая глубина модуляции, что реализуется при выполнении условия:  $U_n \gg U_\Omega$ . При этом можно обеспечить режим с уровнем побочных колебаний – 40 дБ и ниже.

Обычно амплитуда ВЧ сигнала  $U_n$  выбирается в пределах 1...2 В. В этом случае диоды VD1 и VD2 выполняют роль ключей, переключаемых с частотой  $\omega_0$ . Управляющее напряжение  $u_\Omega$  при этом не оказывает влияние на моменты переключения диодов и работает с практически постоянным углом отсечки.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Для определения параметров элементов принципиальной схемы диодного БМ (см. рисунок), используются следующие расчетные соотношения [5].

Индуктивность первичной обмотки трансформатора Т1 определяется из следующего соотношения

$$\Omega \cdot L_{11} = (3..5) \cdot R_{вх}, \quad (\text{П.2.1})$$

где,  $R_{вх}$  – внутреннее сопротивление внешнего источника сигналов и (50...100 Ом), подключаемого ко входу БМ.

Индуктивности полуобмоток вторичной обмотки первого трансформатора Т1

$$\Omega L_{12} = \Omega L_{21} = \Omega L_{11}. \quad (\text{П.2.2})$$

Параметры элементов трансформатора Т2 выбираем аналогичным образом

$$\omega_0 L'_{11} = \omega_0 L'_{12} = \omega_0 L_{22} = (3..5) \cdot R_{н}, \quad (\text{П.2.3})$$

где  $R_{н}$  – сопротивление внешней нагрузки равное (100...200) Ом.

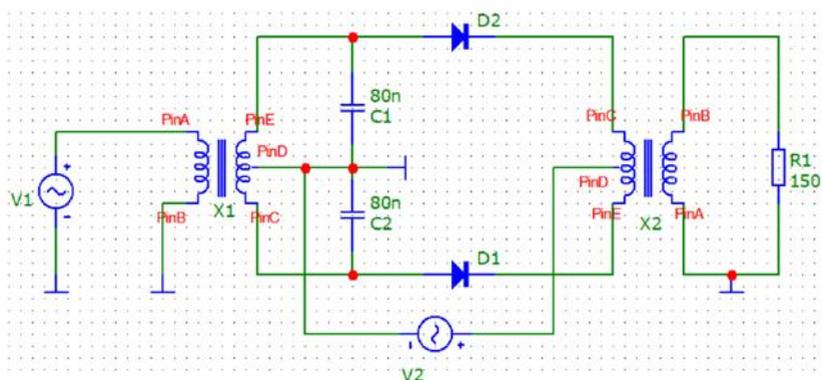
Емкости первого и второго блокировочных конденсаторов определяются из условия

$$C_{бл} = (10..20) / (\omega_0 \cdot R_{вх}), \quad (\text{П.2.4})$$

Электронная модель диодов выбирается с использованием данных приведенных в [6]. Необходимо выбрать модель маломощного высокочастотного диода.

Структура схемы для исследований составляется также с учетом рекомендаций, приведенных в [6].

В результате электронная схема балансного модулятора в система MicroCap принимает следующий вид, приведенный на рисунке.



Электронная схема исследуемого БМ

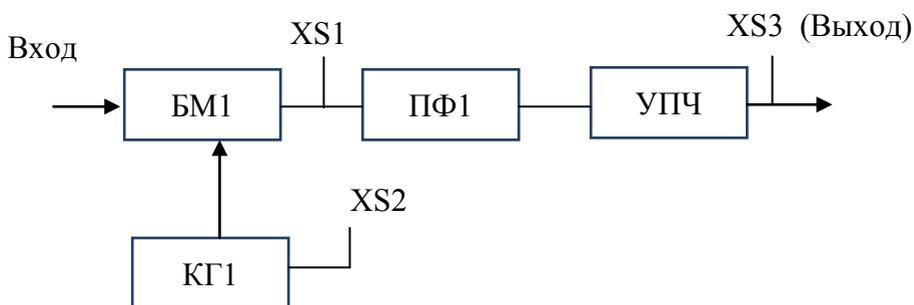
Аналогичным образом может быть получена и электронная схема кольцевого БМ, содержащего два параллельно соединенных балансных модулятора, что существенно увеличивает уровень выходного сигнала.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе экспериментальных исследований используются лабораторная установка, на переднюю панель которой выведены гнезда: «Вход» – для подключения внешнего генератора звуковых частот; XS1 – гнезда для измерения параметров сигнала на выходе БМ1, в простейшем случае – две боковые частоты, в общем случае – двухполосный сигнал; XS2 для подключения измерительной аппаратуры для контроля параметров синусоидального сигнала несущей частоты  $f_0$ ; XS3-гнезда для измерения параметров сформированного ОМ сигнала: уровня выделяемой боковой частоты, нелинейных искажений, (осциллографа или селективного вольтметра).

При выполнении п.2.2 необходимо изучить структурную схему формирователя ОМ сигнала, используемого для проведения экспериментальных исследований (см. рисунок).



Структурная схема формирователя ОМ сигнала

ОМ сигнал в схеме рисунка формируется следующим образом. Сигнал тональной частоты, поступающий на клеммы «Вход» от внешнего генератора звуковых частот и сигнал от первой поднесущей частоты  $f_0 = 500$  кГц, вырабатываемой первым кварцевым генератором (КГ1), подаются на первый БМ1. На выходе БМ1, в случае идеального перемножения, образуются две боковые частоты  $f_0 \pm F$  (двухполосный сигнал). Далее обе боковые частоты поступают на вход первого полосового фильтра ПФ1 с высокой избирательностью, который выделяет нижнюю боковую частоту  $f_0 - F$ . Затем сигнал частоты  $f_0 - F$  усиливается усилителем промежуточной частоты (УПЧ), компенсирующим затухание, вносимые ПФ1 в цепь формируемого радиосигнала. Гнезда XS1...XS3 используются для контроля параметров сигналов, действующих соответственно на выходе БМ1, выходах кварцевого генератора КГ1 и формирователя одноступенчатого ОМ радиосигнала лабораторной установки.

В современной аппаратуре при формировании ОМ сигнала используется метод повторной БМ, при котором используются две и более ступени переноса спектра частот [7]. При этом наиболее высокие требования предъявляются к первому полосовому фильтру, так как относительный разнос между частотами  $f_0 - F$  и  $f_0 + F$ , равный  $2F/f_0$ , для тональных частот  $F \in 300..3400$  Гц составляет доли процента. Поэтому для подавления верхней боковой полосы, требуется фильтр с высокой добротностью и большой крутизной характеристики затухания. В качестве фильтра выбираются электромеханические и кварцевые и другие фильтры, крутизна характеристик затухания которых составляет более 60 дБ/кГц, а потери равны около 10 дБ при неравномерности АЧХ не более 3 дБ в полосе пропускания [3,4].

К полосовым фильтрам других ступеней переноса спектра требования по избирательности менее жесткие [3,4],

так как относительный разнос между выделяемой и подавляемой частотами (полосами частот) значительно больше, чем на выходе первой ступени.

Подавление не менее чем на 40 дБ нижней боковой полосы при  $f_0=0,5$  МГц составляет не менее 67 дБ/кГц и при заданном разносе частот может быть достигнуто специальными высокоизбирательными полосовыми фильтрами.

Необходимость использования кварцевых генераторов обусловлена высокими требованиями к стабильности частоты систем связи с однополосной модуляцией, которая, в соответствии с [7] при работе в телефонном режиме составляет 10...20 Гц.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Общие указания по работе.....	3
2. Домашнее задание .....	4
3. Методические указания по выполнению домашнего задания .....	5
4. Лабораторное задание.....	7
5. Содержание отчета.....	11
6. Контрольные вопросы.....	11
Библиографический список.....	15
Приложение 1. Краткие теоретические сведения о однополосной модуляции.....	16
Приложение 2. Расчетные соотношения для определения параметров элементов схемы БМ или КБМ.....	22
Приложение 3. Описание лабораторной установки для экспериментальных исследования ОМ формирователя.....	24

ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВОГО  
И ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ОДНОПОЛОСНОГО  
РАДИОСИГНАЛА. ЧАСТЬ 1

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторной работы для студентов направления  
11.04.01 «Радиотехника» (профиль «Защита информации в каналах  
связи») и специальности 10.05.01 «Радиоэлектронные системы  
и комплексы» очной формы обучения

**Составитель**

**Бочаров Михаил Иванович**

Редактор Е. А. Кусаинова

Подписано к изданию 09.10.2020.  
Объем данных 840 Кб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14.