

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиотехники»

Кафедра радиотехнических систем

А.М. Бригидин, В.В. Ползунов

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию и практическим занятиям
для студентов специальностей «Радиотехника», «Радиоэлектронные системы»,
«Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения», «Радиоинформатика»,
«Радиоэлектронная защита информации»
всех форм обучения

Минск 2006

УДК 621.396.61 (075.8)

ББК 32.848 я 73

Б 87

Бригидин А.М.

Б 87 Радиопередающие устройства: Учебно-метод. пособие по курсовому проектированию и практическим занятиям для студ. спец. «Радиотехника», «Радиоэлектронные системы», «Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения», «Радиоинформатика», «Радиоэлектронная защита информации» всех форм обуч./А.М. Бригидин, В.В. Ползунов. – Мн.: БГУИР, 2006. – 104 с.: ил.
ISBN 985-444-821-5

В пособии приведены методические указания по курсовому проектированию и практическим занятиям, темы курсовых проектов, предлагается порядок выполнения проекта, содержатся указания по оформлению, изложены темы практических занятий, в каждой из которых даны краткие теоретические сведения, примеры расчёта каскадов передатчиков, задачи и вопросы для самостоятельной работы.

УДК 621.396.61 (075.8)
ББК 32.848 я 73

ISBN 985-444-821-5

© Бригидин А.М., Ползунов В.В., 2006
© БГУИР, 2006

КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ. ВВЕДЕНИЕ

1. Методические указания по выполнению курсового проектирования

Курсовым проектированием завершается изучение курса «Радиопередающие устройства».

В процессе выполнения курсового проекта студент должен овладеть методами проектирования как отдельных каскадов, так и всего радиопередатчика в целом. При этом он должен творчески применить знания, полученные при изучении курса «Радиопередающие устройства» и других радиотехнических дисциплин. Передатчик должен проектироваться на основе последних достижений в технике радиопередающих устройств с использованием современной элементной базы. Поощряется применение новых технических решений при выполнении проекта.

Конкретная тема курсового проекта определяется руководителем, который контролирует систематичность работы студентов, проверяет выполнение графика работ, ставит в известность заведующего кафедрой и деканат о результатах проверок. Основные этапы работы над проектом:

1. Обсуждение с преподавателем темы проекта. Получение технического задания на курсовой проект.
2. Проведение экспериментальных исследований (в случае соответствующего требования в техническом задании).
3. Составление схемы передатчика, разработка конструкции и проведение расчетов.
4. Оформление пояснительной записки и выполнение графического материала.
5. Передача на проверку пояснительной записки и чертежей.
6. Устранение замечаний преподавателя.
7. Защита курсового проекта.

По результатам защиты технически грамотно выполненного проекта, а также с учетом качества оформления пояснительной записки и чертежей студенту выставляется оценка.

Качество проекта повышается при практической реализации проектируемого передатчика или его отдельных частей, проведении расчетов с помощью ЭВМ, а также применении новых технических решений.

В случае неудовлетворительной защиты студенту предлагается повторно выполнить курсовой проект по новой тематике или с разрешения заведующего кафедрой переработать прежний.

Защищенные проекты хранятся на кафедре в течение года. Лучшие из них могут использоваться для обобщения и распространения учебно-методического опыта, а также для участия в различных конкурсах, например «Студент и научно-технический прогресс».

Методические указания помогут студенту лучше понять вопросы, которые он должен решить в процессе выполнения курсового проекта, в какой последовательности их следует решать, какой воспользоваться литературой по тем или иным вопросам, и наконец, как правильно оформить проект.

Решение конкретных задач, сформулированных в техническом задании, и проведение необходимых расчетов проводится с привлечением источников, перечисленных в разделе «Литература».

2. Цель и задачи курсового проектирования

Курсовое проектирование учит целесообразному применению теоретического материала курса для решения задач технического расчета радиопередающих устройств, рациональному и обоснованному выбору наиболее правильного их решения, рациональному использованию специальной литературы, развивает у студентов навыки инженерного проектирования радиотехнической аппаратуры, подготавливает их к дипломному проектированию.

3. Задание по курсовому проектированию

Задание по курсовому проектированию является отчетным документом, без которого пояснительная записка на проверку не принимается, а проект к защите не допускается.

Объем задания в соответствии с учебным планом рассчитывается на 60 часов самостоятельной работы студента.

В курсовом проекте разрабатывается одна из указанных ниже тем.

Буквенные обозначения	Назначение передатчика	Буквенные обозначения	Назначение передатчика
А	Сотовая мобильная связь	Ж	Радиовещание и связь
Б	Телевидение	З	РЛС обнаружения с оптимальной обработкой сигнала
В	Спутниковая радиосвязь	И	РЛС обнаружения с селекцией движущихся целей
Г	Телефонная беспроводная связь	К	Системы телеметрии
Д	Радиорелейная и тропосферная связь	Л	Ламповые РТС измерения
Е	Профессиональная мобильная радиосвязь		

Литература рекомендована таким образом, чтобы при отсутствии в библиотеке одной книги ее можно было заменить одной или двумя другими.

В техническом задании к курсовому проекту приводятся требования по параметрам и характеристикам разрабатываемого передатчика.

3.1. Исходные данные для проектирования

3.1.1. Назначение передатчика (например: радиовещательный, связной и т.д.). Здесь приводятся сведения определенного вида о передаваемой информации и условиях работы передатчика.

3.1.2. Выходная мощность в режиме непрерывных колебаний или импульсном режиме.

3.1.3. Рабочая частота или рабочий диапазон частот.

3.1.4. Вид модуляции или манипуляции.

3.1.5. Нестабильность (стабильность) частоты колебаний.

3.1.6. Другие технические требования к радиопередатчику.

Кроме того, в задании приводятся основные требования по объему выполняемых расчетов, графическому материалу и эксперименту.

При выполнении курсового проекта техническое задание следует доработать, выбрав и обосновав другие, не указанные в таблицах (В.1–В.11), дополнительные технические характеристики проектируемого передатчика.

3.2. Порядок выдачи задания

В течение двух первых недель учебного семестра, в котором выполняется курсовой проект, руководитель определяет для студента тему и вариант технического задания по курсовому проектированию. Студенты заносят в типографский бланк задания исходные данные для проектирования согласно табл. В.1–В.11 своего варианта. Заполненный и подписанный студентом и руководителем бланк задания представляется руководителем заведующему кафедрой на утверждение.

Пример заполнения бланка задания по курсовому проектированию приведен в прил. 4.

4. Объем и содержание курсового проекта

Курсовой проект состоит из пояснительной записки объемом 30–40 страниц рукописного текста и двух листов графического материала. Допускается выполнение записки на персональном компьютере. Содержание пояснительной записки должно соответствовать техническому заданию. Каждая пояснительная записка должна содержать следующие разделы и материалы:

1. Титульный лист, выполненный в соответствии со стандартом БГУИР [43]. Все надписи на титульный лист наносятся черной тушью нормативным чертежным шрифтом.

2. Задание на курсовой проект на типографическом бланке, утвержденное заведующим кафедрой.

3. Содержание. В нем приводятся названия разделов и подразделов в точном соответствии с текстом пояснительной записки и с указанием страниц. Пример содержания пояснительной записки приведен в прил. 2.

4. Введение, в котором раскрывается назначение и основные особенности проектируемого передатчика.

5. Расчет и составление функциональной схемы передатчика.

6. Расчет электрических режимов работы высокочастотных усилителей мощности.

7. Расчет электрических режимов работы умножителей частоты (при наличии такого требования в задании).

8. Расчет возбудителя передатчика (в частном случае одного автогенератора) и стабильности частоты колебаний.

9. Расчет блокировочных элементов схемы.

10. Расчет выходного каскада модулятора.

11. Таблицы с указанием всех напряжений и токов, требуемых для питания передатчика, расчет его промышленного КПД.

12. Описание схемы контроля, защиты и управления передатчиком.

13. Конструктивный расчет одного из узлов передатчика (по указанию преподавателя).

14. Результаты экспериментальной проверки отдельных каскадов передатчика (при наличии такого требования в задании).

15. Спецификация к принципиальной электрической схеме.

16. Список использованной литературы.

17. Приложения.

Графический материал пояснительной записки состоит из рисунков и графиков, поясняющих работу отдельных каскадов передатчика. Включаются рисунки функциональной схемы и электрических схем отдельных каскадов.

Принципиальная электрическая схема отдельного каскада передатчика выполняется в соответствии с требованиями [43] на миллиметровой или обычной бумаге.

Графический материал проекта включает два листа чертежей стандартного формата. 1-й лист – принципиальная электрическая схема передатчика (формат А1), являющаяся повторением принципиальной электрической схемы пояснительной записки; 2-й лист – функциональная схема передатчика и конструкция его отдельного узла (формат А1).

Спецификация схемы приводится на отдельных листах в виде приложения к пояснительной записке.

5. Последовательность выполнения курсового проекта

5.1. Составление индивидуального календарного плана работы над проектом.

При выдаче технического задания (см. раздел 3.2) руководитель определяет трудоемкость и сроки выполнения отдельных разделов проекта с учетом

специфики и особенностей каждой работы. Индивидуальный календарный план включается в техническое задание. Типовой календарный план выполнения курсового проекта приведен в прил. 1.

5.2. Ознакомление с литературой по теме проекта.

5.3. Анализ задания по курсовому проектированию. Выбор и обоснование технических требований, не указанных в задании.

5.4. Составление и расчет функциональной схемы радиопередатчика, определение количества каскадов и используемых в них активных элементов; выбор метода осуществления модуляции и стабилизации частоты. Функциональная схема должна давать полное представление о структуре радиопередатчика и его элементной базе.

5.5. Электрический расчет каскадов радиопередатчика. Расчет высокочастотной части передатчика начинается обычно с выходного каскада и заканчивается возбудителем (задающим генератором). Такая последовательность расчета обусловлена тем, что входная цепь каждого последующего каскада является нагрузкой для предыдущего. Затем производится расчет выходного каскада модулятора. Расчет каждого высокочастотного каскада состоит из двух этапов: первый состоит в расчете энергетического режима работы активного элемента, второй – в расчете входной и выходной электрических цепей. Все элементы каскада должны работать в рамках предельно допустимых эксплуатационных режимов с целью обеспечения высокой надежности.

5.6. Расчет стабильности частоты колебаний исходя из соответствующего требования технического задания.

5.7. Составление таблицы, отражающей потребление энергии по цепям передатчика. Расчет промышленного КПД передатчика.

5.8. Проведение экспериментальных исследований (при наличии такого требования в задании).

5.9. Составление принципиальной электрической схемы.

Принципиальная электрическая схема составляется после выполнения всех расчетов. На ней показывают все элементы рассчитанных и нерассчитанных каскадов, цепи связи между каскадами, органы управления и контроля за работой радиопередатчика. В схеме должны быть предусмотрены меры по повышению устойчивости работы высокочастотных каскадов и выполнению требований электромагнитной совместимости. В этой связи в цепь питания включаются фильтры низких частот, на выходе передатчика предусматривается использование полосового фильтра.

С целью контроля за работой радиопередатчика предусматривается применение специальных датчиков. Так, например, для контроля величины выходной мощности используется направленный ответвитель токов активных элементов мощных каскадов – шунты, соединяемые с измерительным прибором, и т.д.

В мощных каскадах следует предусматривать электронные схемы защиты, предотвращающие вредные последствия, связанные с нарушением нормативного эксплуатационного режима работы радиопередатчика. При высоковольтных

источниках питания (свыше 1000 В) предусматривается применение блокировки и сигнализации.

На схеме показывают органы управления работой радиопередатчика: включением, измерением уровня мощности, перестройкой частоты излучаемого сигнала и т.д.

Схема выполняется в соответствии с требованиями [43] на листе стандартного формата А1.

5.10. Расчет и разработка конструкции узла передатчика.

В этой части проекта определяются все геометрические размеры узла передатчика по токам и напряжениям, воздействующим на него в каскаде передатчика. Обосновывается конструкция, выбирается масштаб и изображается на чертеже в двух или трех проекциях.

5.11. Оформление пояснительной записки.

Пояснительная записка к проекту пишется на листах стандартного размера 210x297 мм с полями: 20 мм слева и 10–15 мм справа. Полностью оформленная записка должна соответствовать пунктам раздела 4.

Текст пояснительной записки должен быть написан четко и аккуратно черными или синими чернилами с одной стороны листа. Весь текст должен быть разбит на разделы и подразделы (см. раздел 3). Заголовки должны быть краткими. Пример оформления раздела пояснительной записки приведен в прил. 3.

При написании записки следует строго придерживаться установленной технической терминологии. Допускаются сокращения, принятые в литературе, например одна боковая полоса – ОБП; частотная автоподстройка – ЧАП. Сокращение поясняется при первом введении в текст.

В тексте нумеруются все листы записки, кроме титульного. Номер листа проставляется в верхнем поле в центре. Формулы, рисунки, таблицы, список литературы имеют соответственно отдельную сквозную нумерацию.

Формула располагается отдельной строкой, ее номер указывают с правой стороны. После формулы следует дать расшифровку символов, встречающихся в первый раз.

Рисунки выполняются аккуратно, чертежными инструментами, в соответствии с требованиями [43]. На одном листе может быть расположено несколько рисунков.

В пояснительной записке могут приводиться характеристики активных элементов, применяемых в рассчитываемом радиопередатчике. На них производятся необходимые построения при проведении расчета графическим путем.

В записке должны быть ссылки на использованную литературу, в том числе и справочники. Номер источника заключается в квадратные скобки, например «согласно [3], получили ...».

Все пояснения в тексте должны быть краткими. Известные положения и определения из литературы в записку не переписываются.

Листы пояснительной записки должны быть сброшюрованы в обложку из плотной чертежной бумаги (лист формата А3 сложен пополам). Одна половина обложки используется в качестве титульного листа.

5.12. Оформление чертежей.

Чертежи принципиальной электрической схемы выполняются в соответствии с требованиями [44, 45] на листах формата А1. Все элементы схемы изображаются в виде условных знаков, размеры и начертания которых приведены в [46]. Каждому элементу схемы присваивается буквенно-позиционное обозначение согласно [44], которое состоит из буквенного элемента и порядкового номера, записанного тем же шрифтом после буквы. Например, R15, C33 Порядковые номера присваиваются элементам схемы слева направо и сверху вниз. Буквенно-позиционные обозначения представляются рядом с условным графическим изображением элемента по возможности с правой стороны или над ним.

Все элементы принципиальной электрической схемы записываются в перечне элементов. Перечень элементов выполняется в виде таблицы, в которой все элементы схемы объединяются в соответствующие группы (транзисторы, конденсаторы и т.д.).

Таблица заполняется в следующем порядке:

- (1) – представляется номер позиции по порядку;
- (2) – позиционное обозначение элемента;
- (3) – наименование элемента указанной позиции;
- (4) – количество элементов;
- (5) – примечание.

Аналогичный перечень элементов может быть оформлен и на чертеже принципиальной схемы передатчика. Несколько пустых строчек в таблице должны быть оставлены для внесения возможных изменений. На принципиальной схеме рекомендуется указать:

- а) маркировку выводов;
- б) номиналы резисторов и конденсаторов по упрощенному способу обозначения единиц измерения согласно [45];
- в) характеристики возбудителя (автогенератора) и выходных цепей передатчика.

Чертежи отдельных каскадов передатчика выполняются в соответствии с требованиями [47]. Все чертежи оформляются соответствующими штампами.

Заполняется штамп следующим образом:

- (1) – наименование изображенного на чертеже устройства;
- (2) – обозначение документа (для курсового проекта не заполняется);
- (3) – материал детали (заполняется только на чертежах деталей);
- (4) – литература, присвоенная данному документу по ГОСТ 2.103-68 (для курсового проекта не заполняется);
- (5) – масса изделия по ГОСТ 2.109-73 (для курсового проекта не заполняется);
- (6) – масштаб изображения (рекомендуется ГОСТ 2.302-68, ГОСТ 2.109-73);

- (7) – порядковый номер листа;
- (8) – общее количество листов (графу заполняют только на первом листе);
- (9) – наименование или различительный индекс предприятия, выпускающего документ (для курсового проекта в графе вписывается факультет и номер группы);
- (10) – характер работы, выполняемой лицом, подписавшим документ;
- (11) – фамилии лиц, подписавших документ;
- (12) – подписи лиц, фамилии которых указаны в графе (11);
- (13) – дата подписания документа;
- (16–18) – таблицы изменений, которые заполняются в соответствии с ГОСТ 2.503-74 (для курсового проекта не заполняется);

Подписи на чертежах и схемах выполняются стандартным чертежным шрифтом в соответствии с [48]. Типы линий и их толщину выбирают согласно [48].

6. Защита курсового проекта

Пояснительная записка сдается руководителю проекта на проверку не позднее чем за три дня до защиты. Графическая часть проекта проверяется и подписывается руководителем после проверки пояснительной записки, но не позднее чем за один день до защиты. После проверки руководитель пишет свои замечания и решение о допуске к защите на обратной стороне титульного листа.

Курсовой проект защищается перед комиссией, назначаемой заведующим кафедрой, при непосредственном участии руководителя курсового проектирования.

Защита начинается с доклада студента о проделанной работе, сопровождающегося пояснениями на графическом материале. Время доклада 5–7 минут. Рекомендуется следующий план доклада:

1. Полное название темы курсового проекта и назначение спроектированного радиопередатчика.
2. Перечисление исходных данных.
3. Обоснование принятого варианта технического решения, оценка его достоинства и недостатков, сравнение с другими вариантами.
4. Особенности разработанной схемы и трудности, встреченные при проектировании.
5. Заключение о выполнении технического задания.

7. Оценка курсового проекта

При оценке курсового проекта учитывается:

1. Систематичность работы студента над курсовым проектом по результатам опроцентовок.
2. Ясность и четкость доклада по материалам курсового проекта.

3. Технически грамотное обоснование принимаемых решений при проектировании как отдельных каскадов, так и радиопередатчика в целом.
4. Технически грамотные электрический и конструктивный расчеты.
5. Качество оформления пояснительной записки и графического материала.
6. Практическая реализация проектируемого передатчика и его отдельных частей.
7. Экспериментальные исследования.
8. Проведение расчетов с помощью ЭВМ.

В результате защиты курсовой проект оценивается дифференцированной отметкой по четырехбалльной системе. Положительная оценка записывается в зачетную книжку и ведомость за подписью руководителя курсового проекта.

Студент, не представивший в установленный срок курсовой проект или не защитивший его по неуважительной причине, считается имеющим академическую задолженность.

Библиотека БГУИР

Таблица В.1

Тема А: Передатчики сотовой подвижной (мобильной) радиосвязи

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Мощность АС, Вт	20	8	5	2	0,8	0,25	0,5	0,6	3,0	0,6
2. Диапазон рабочих частот, МГц	890–915	890–915	890–915	1710–1785	1850–1910	1710–1785	1850–1910	824–849	824–849	1850–1910
3. Разделение каналов	ЧВР	ЧВР	ЧВР	ЧВР	ЧВР	ЧВР	ЧВР	КР	КР	КР
4. Число каналов на несущую	8	8	8	8	8	8	8	55	60	62
5. Ширина радиоканала, кГц	200	200	200	200	200	200	200	1250	1250	1250
6. Скорость передачи, Кбит/с	271	271	271	271	271	271	271	1228	1228	1228
7. Вид модуляции	ГЧМ МС	ГЧМ МС	ГЧМ МС	ГЧМ МС	ГЧМ МС	ГЧМ МС	ГЧМ МС	ОФМ-Ч	ОФМ-Ч	ОФМ-Ч

Принятые сокращения: ЧВР, КР – соответственно частотно-временное и кодовое разделение каналов;
 ГЧММС – гауссова частотная модуляция с минимальным сдвигом;
 ОФМ-Ч – четырёхуровневая относительная фазовая манипуляция;
 АС – абонентская станция.

Таблица В.2

Тема Б: Телевизионные передатчики

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.Выходная мощность, Вт	3	10	20	100	200	3000	1000	5000	10000	20000
2.Номер канала	1–2	3–5	6–12	1–2	6–12	21–34	21–34	35–81	35–81	35–81
3.Нестабильность частоты канала изображения не более, Гц	±90	±90	±90	±90	±90	±100	±100	±100	±100	±100
4.Допустимая неравномерность АЧХ в рабочей полосе –0,75...+6,0 МГц, дБ										
5. Нелинейные искажения (дифференциальный коэффициент передачи),%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	2,0	2,0	2,0
6. Сопротивление выходной нагрузки (несимметричной), Ом	10	10	10	10	11	11	11	12	12	12
	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75

Примечание. При проектировании передатчика звукового сопровождения его мощность соответственно в 10 раз меньше мощности РПДУ-изображения.

Тема В: Передатчики спутниковой радиосвязи

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Линия радиосвязи	ЗСт	ЗСт	ЗСт	ЗСт	ЗСт	БР	БР	БР	БР	БР
2. Мощность, Вт	3000.0	1500	1500	750.0	700.0	40.0	200.0	40.0	10.0	10.0
3. Частота излучения, ГГц	6,0	14,0	17,3	14,0	6,0	4,0	11,0	11,7	11,0	4,0
4. Вид модуляции	ЧМ	ЧМ	ФМ	ФМ-2	ФМ	ЧМ	ЧМ	ФМ	ФМ-2	ФМ
5. Сигналы (разделение каналов)	ТВ,ЗС, РВ (ЧРК)	ТВ, ЗС (ЧРК)	ТВ, ЗС (ЧРК)	МТФ (ВРК)	ТВ, ТФ (ВРК)	ТВ,ЗС, РВ (ЧРК)	ТВ, ЗС (ЧРК)	ТВ, ЗС (ЧРК)	ТВ,ТФ, МТФ (КРК)	ТВ,ТФ, МТФ (КРК)
6. Ширина полосы пропускания $\Delta f_{\text{ств}}$, МГц	37	40	27	40	27	37	40	27	28	20
7. Допустимое излучение на гармониках, дБ (минус)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

Принятые сокращения: ЗСт – земная станция; БР – бортовой ретранслятор; ЧМ, ФМ – соответственно частотная и фазовая модуляции; ФМ-2 – бинарная фазовая модуляция; ТВ – телевидение; ЗС – звуковое сопровождение; РВ – радиовещание; МТФ – многоканальная телефония; ЧРК, ВРК, КРК – соответственно частотное, временное, кодовое разделение каналов.

Примечание. Бортовые ретрансляторы работают на геостационарной орбите.

Таблица В.4
Тема Г: Передатчики системы бесшнуровых телефонов

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.Выходная мощность, Вт	0,18	0,18	0,18	0,2	0,2	0,2	0,25	0,25	0,25	0,25
2.Рабочий диапазон, МГц	1897,71 ЧВР	1895,6 ЧВР	1893,8 ЧВР	1892,1 ЧВР	1890,4 ЧВР	1888,7 ЧВР	1886,9 ЧВР	1885,2 ЧВР	1883,5 ЧВР	1881,7 ЧВР
3.Разделение каналов										
4.Число каналов на несущую	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
5.Ширина полосы пропускания канала, кГц	1728	1728	1728	1728	1728	1728	1728	1728	1728	1728
6.Скорость передачи, Кбит/с	1152 ГЧММС	1152 ГЧММС	1152 ГЧМ	1152 ГЧМ	1152 ГЧМ	1152 ГЧМ	1152 ГЧМ	1152 ГЧМ	1152 ГЧМ	1152 ГЧМ
7.Вид модуляции			МС	МС	МС	МС	МС	МС	МС	МС

Принятые сокращения: ЧВР – частотно-временное разделение каналов;
ГЧММС – гауссова частотная модуляция с минимальным сдвигом.

Таблица В.5

Тема Д: Передатчики радиорелейных и тропосферных радиолиний связи

Технические условия	Виды передатчиков									
	радиорелейные						тропосферные			
	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Выходная мощность, Вт	10	20	5,0	10	3,0	30	10000	30000	1000	15000
2. Диапазон частот, ГГц	8,0–8,5	5,0–5,4	2,9–3,6	10–10,5	9,0–9,4	3,0–4,0	2,8	5,4	8,9	8,0–8,5 ЧМ
3. Модуляция	ЧМ	ЧМ	ЧМ	ЧМ	ЧМ	ЧМ	ОБП	ЧМ	ЧМ	
4. Девиация частоты на один канал, кГц	140	200	200	100	100	200	—	100	140	200
5. Стабильность частоты	$(2...5)^* 10^{-5}$	$(2...5)^* 10^{-5}$	$(2...5)^* 10^{-5}$	$(2...5)^* 10^{-5}$	$(2...5)^* 10^{-5}$	$(2...5)^* 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
6. Коэффициент нелинейных искажений, %	0,5	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	2,0	3,0	2,0	0,5
7. КСВН нагрузки	1,7	1,6	1,9	1,5	1,6	1,5	1,3	1,3	2	1,7

Таблица В.6

Тема Е: Передатчики профессиональной подвижной (мобильной) радиосвязи

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.Мощность, Вт	30	25	10	100	30	20	10	50	100	8
2.Диапазон частот, МГц	14–24	100–150	50–75	25–50	400	100–150	1000	100–150	50–75	150–156
3.Стабильность частоты	$5 \cdot 10^{-7}$	$(2 \dots 5)^* 10^{-6}$	$(2 \dots 5)^* 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$(2 \dots 5) 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$(2 \dots 5)^* 10^{-6}$	$(2 \dots 5)^* 10^{-6}$	$(2 \dots 5)^* 10^{-6}$	$(2 \dots 5) 10^{-6}$
4.Допустимое излучение на гармониках, дБ (минус)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
5.Вид модуляции	ОБП	ЧМ	ФМ	АМ	ЧМ	АМ	ЧМ	ФМ	ЧМ	ЧМ
6.Допустимая величина нелинейных искажений K_n , %	2,0	1,0	2,0	4,0	2,0	3,0	1,0	2,0	2,0	4,0
7.Допустимая неравномерность АЧХ 1,5 дБ для полосы частот, Гц	300–	300–	300–	300–	300–	300–	300–	300–	300–	300–
8.Девиация частоты,кГц	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400	3400
9.Диапазон модулирующих частот, кГц	—	5	10	—	10	—	20	5	5	10
	—	300–3400	300–3400	—	300–3400	—	300–3400	300–3400	300–3400	—

Тема Ж: Радиовещательные и связные передатчики

Технические условия	Радиовещание					Телефонно-телеграфная связь				
	Виды модуляции									
	амплитудная					одной боковой полосой при подавлении несущей на 45 дБ			амплитудная	
	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Мощность, кВт	10	25	50	120	150	0,25	0,5	1,5	20	60
2. Диапазон волн, М	200-550	13-50	13-50	13-50	700-2000	10	15	18	13-50	15-50
3. Стабильность частоты	±10Гц	±50Гц	±50Гц	±50Гц	±10Гц	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
4. Допустимое излучение на гармониках, дБ (минус)	35	35	35	35	35	50	50	50	50	30
5. Допустимая величина нелинейных искажений, 0 при M=0,95										
6. Допустимая неравномерность частотной характеристики для полосы частот, Гц	4 ±1,5дБ 50– 8000	4 ±1,5дБ 50– 8000	4 ±1,5дБ 50– 8000	4 ±1,5дБ 50– 8000	4 ±2дБ 50– 8000	5 ±3дБ 300– 3400	5 ±3дБ 300– 3400	5 ±3дБ 300– 3400	5 ±2дБ 50– 3400	3 ±2дБ 50– 3400

Тема 3: Импульсные передатчики РЛС-обнаружения с оптимальной обработкой

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Мощность в импульсе, кВт	500	8000	2000	100	250	2000	100	200	2000	700
2. Длительность импульса, мкс	1,0	1,5	2,0	1,0	1,5	1,5	4	1,0	4,0	1,0
3. Рабочая частота, ГГц	1200–1400	1200–1400	2900–3100	1200–1400	5400–5800	5400–5900	8900–9600	5400–5800	2800–3400	2700–2900
4. Частота следования, Гц	1000	500	600	1000	800	500	1000	1000	300	500
5. Нестабильность фазы, град.	1,8	1,5	1,6	1,7	1,7	1,6	1,5	1,6	1,5	–1,6
6. КСВН нагрузки	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	2,0

Тема И: Передатчики РЛС с селекцией движущихся целей

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Мощность импульса, кВт	6000	500	250	225	230	250	0,85	0,8	200	2000
2. Длительность импульса, мкс	5,0	5,0	1,0	2,0	1,0	0,5	2,5	2,5	2,8	3,5
3. Рабочая частота, МГц	1200–1400	1200–1400	9500	9170	9520	9520	3265	3000	570	2900–3100
4. Частота следования, Гц	500	400	450	500	400	1000	400	400	375	400
5. Уровень неиспользованного фона от неподвижного объекта K_0 , дБ (минус)	20	15	18	15	14	20	15	20	20	20
6. КСВН нагрузки	1,5	1,6	1,6	1,7	1,5	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5

Тема К: Передатчики систем телеметрии

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Выходная мощность, кВт	5	6	7	8	9	10	9	10	8	10
2. Частота излучения, МГц	290	300	350	380	400	425	450	850	900	930
3. Стабильность колебаний	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$0,4 \cdot 10^{-6}$	$0,6 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
4. Вид манипуляции	АМ	АМ	ЧМ	ЧМ	АМ	ЧМ	ФМ	ФМ	АМ	ЧМ
5. Скорость передачи, Кбит/с	25	30	24	29	27	35	37	39	40	40
6. Сопротивление нагрузки, Ом	50	50	75	75	50	50	75	75	50	50
7. Допустимое излучение на гармониках, дБ (минус)	35	35	40	45	30	40	40	35	35	35

Тема Л: Ламповые передатчики СВЧ

Технические условия	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Мощность импульса, кВт	10	2	10	50	50	10	4	30	15	8
2. Длительность импульса, мкс	2,0	0,3	2,5	2,0	1,0	0,4	0,2	2,5	2,0	3,0
3. Рабочая частота, МГц	250	200	300	400	400	200	250	375	300	250
4. Частота следования, Гц	800	1000	900	1200	800	700	400	900	250	250
5. Форма импульсов δ , %	3,0	8,0	8,0	10	10	6,0	6,0	8,0	10	8

Примечание. $\delta = \Delta E_a / E_a$ – неравномерность вершины импульса;
 ΔE_a – допустимое изменение анодного напряжения за время импульса;
 E_a – напряжение анодного питания.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Методические указания к практическим занятиям

Решение задач – необходимое условие успешного изучения дисциплины. Задачи закрепляют в памяти формулы и прививают навыки практического применения теоретических знаний.

На практические занятия студент должен приходить, имея при себе данное пособие, учебник по радиопередающим устройствам и конспект лекций. Каждый студент обязан решать задачи самостоятельно, консультируясь у преподавателя. Студент, не успевший решить задачи на занятии, обязан решить их самостоятельно.

Задачи рекомендуется решать в следующей последовательности:

- ознакомление с условием задачи; выделение главного вопроса задачи (Что неизвестно? Какова цель решения?);
- анализ содержания задачи. Исследование исходных данных (Что известно? Что дано?). Внесение дополнительных (уточняющих) условий для получения однозначного ответа. Анализ рекомендуется иллюстрировать рисунками (спектр колебаний, схема каскада, вольт-амперная характеристика активного элемента и т. п.);
- составление плана решения задачи;
- осуществление плана решения;
- проверка ответа (проверка размерностей, решение этой же задачи другим способом).

В начале каждого занятия преподаватель вызывает несколько студентов к доске для контрольного решения наиболее трудных задач домашнего задания, отмечает в журнале выполнение домашнего задания студентами группы. Во время практического занятия преподаватель оценивает в журнале активность студентов (при решении на рабочих местах). Студент, активно работавший на всех занятиях, на последнем получает зачет. Студент, пропустивший занятие, обязан решить задачи самостоятельно и отчитаться на следующем занятии или во время зачета в конце семестра.

Студент, не имеющий зачета по практическим занятиям, к экзамену по курсу не допускается. Общий зачет по дисциплине выставляется при наличии зачетов по практическим и лабораторным занятиям.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Структурные схемы радиопередатчиков

1. Общие сведения

Разнообразные типы передатчиков выполняются как комбинации соответствующих каскадов и блоков. Обобщённая структурная схема радиопередатчика представлена на рис. 1.1.

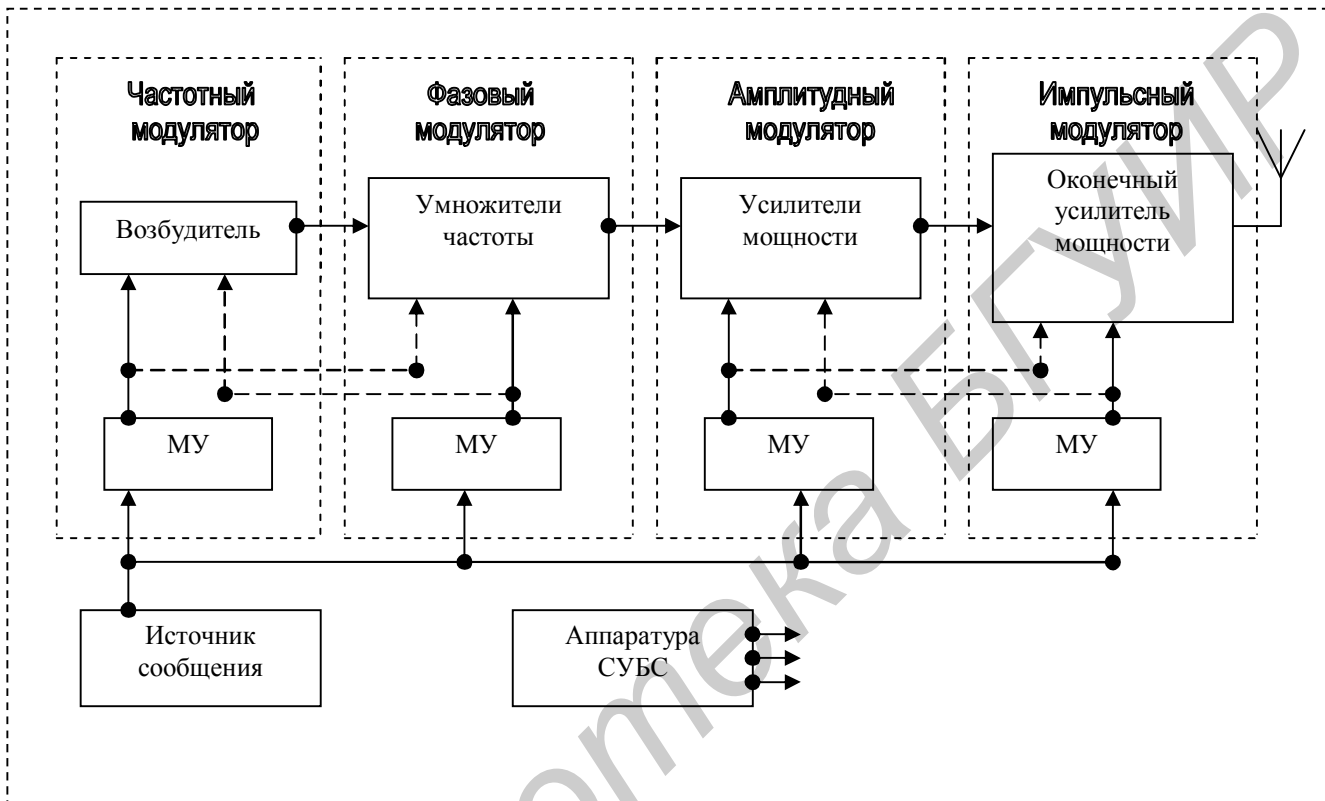


Рис.1.1. Обобщённая структурная схема радиопередатчика

На рис. 1.1 обозначены: МУ — модуляционное устройство; как правило, усилители низкой частоты; СУБС – система управления, блокировки и сигнализации.

Частотная модуляция осуществляется в возбудителе передатчика, фазовая – в ВЧ-умножителях или усилителях, импульсная и амплитудная – в ВЧ-усилителях. Однополосная модуляция производится в первых каскадах передатчика. Модулятор – это ВЧ-каскад передатчика, в котором осуществляется модуляция. С помощью аппаратуры СУБС автоматически выполняются следующие операции: включение/выключение РПУ, перестройка по частоте, стабилизация параметров, защита персонала передатчика при нарушении нормальных условий эксплуатации и т.д.

При составлении и расчёте структурной схемы РПУ исходят из его назначения, условий работы и следующих основных параметров: P_A – выходной

мощности, подводимой к антенне; $f_H \dots f_B$ – диапазона рабочих частот, стабильности частоты, вида модуляции и характеристик модулирующего сигнала.

Составление структурной схемы РПДУ является ориентировочной процедурой, поскольку она производится на основе использования усреднённого коэффициента усиления по мощности K_P , представляющего собой отношение номинальных (паспортных) мощностей электронных приборов двух соседних каскадов. Задача составления структурной схемы состоит в том, чтобы определить рациональное число каскадов высокой частоты между автогенератором и выходом РПДУ, обеспечивающее выполнение заданных технических требований к передатчику при минимальных затратах средств на изготовление и при достаточно высоком КПД.

Колебания маломощного возбудителя ($P_{ВЫХ} \leq 0,01$ Вт) и сравнительно низкочастотного ($f_{АГ} \leq 10$ МГц) последовательно усиливаются несколькими каскадами усиления и умножения частоты, т.е. доводятся до заданной мощности и частоты.

Если рабочая частота передатчика лежит в некотором диапазоне $\Delta f = f_B - f_H$, то построение возбудителя усложняется. При небольшом числе рабочих частот возбудитель строится по принципу кварц-волна, что означает: каждой из частот соответствует свой кварцевый автогенератор. Переход с одной частоты на другую осуществляется с помощью коммутатора. В простейших возбудителях такого типа используется также интерполяционный принцип формирования выходных колебаний. При большом числе частот возбудитель представляет собой цифровой синтезатор частот, в состав которого входит кварцевый автогенератор, называемый опорным, делитель с переменным коэффициентом деления и система ФАПЧ.

В мощных оконечных транзисторных каскадах приходится объединять для совместной работы много (десятки, сотни) транзисторов с помощью схем сложения мощностей.

В промежуточных каскадах необходимо использовать приборы с высокими коэффициентами усиления по мощности. КПД цепей согласования обычно не большие. Ориентировочно КПД цепей согласования могут определяться табл. 1.

Таблица 1

K_P	3	5	10	20	>40
$\eta_{ЦС}$	0,8	0,7	0,5	0,4	0,25

При сопоставлении справочных данных с требуемой мощностью P_1 на некоторой частоте f нужно иметь в виду следующее: максимальная мощность P_1 мало изменяется в различных схемах и на различных частотах, так как обычно ограничена допустимыми мощностями рассеивания, коллекторным напряжением или током; КПД коллекторной цепи η несколько повышается с уменьшением частоты, однако эти изменения незначительны; коэффициент

усиления по мощности на частотах, где он не известен, определяется по формуле $K_P = K'_P \left(\frac{f'}{f} \right)^2$. Штрихом обозначены типовые экспериментальные коэффициент усиления по мощности и частота, взятые из справочных данных.

Расчёт структурной схемы РПДУ начинается с определения необходимого числа транзисторов для получения заданной мощности и, как правило, с выбора активного элемента оконечного каскада.

2. Пример построения структурной схемы радиопередатчика

Исходные данные: составить структурную схему радиопередающего устройства (РПДУ), имеющего выходную мощность $P_A = 7,5$ Вт на частоте $f = 50$ МГц. Модуляция амплитудная ($m = 1$). Допустимая нестабильность частоты 10^{-5} . Напряжение питания $E_{II} = 12$ В.

а) Выбор активных элементов для амплитудного модулятора.

АМ производится либо в оконечном каскаде, либо одновременно в оконечном и предоконечном каскадах. Последний случай принадлежит к комбинированной модуляции, что является разновидностью АМ. Для проектируемого РПДУ выбираем комбинированную модуляцию. При АМ выбор оконечного транзистора определяется режимом максимальной мощности:

$$P_{A \max} = P_A (1 + m)^2 = 7,5 \cdot 4 = 30 \text{ Вт.}$$

Такая мощность на частоте 50 МГц может быть получена на трех транзисторах типа КТ903А. Колебательная мощность в коллекторной цепи транзистора выходного каскада P_1 , строго говоря, отличается от мощности отдаваемой в нагрузку $P_{A \max}$ из-за потерь в цепи согласования.

$$P_{A \max} = P_1 \eta_{ЦС},$$

где $\eta_{ЦС}$ – КПД цепи согласования.

Обычно в транзисторных передатчиках вплоть до волн дециметрового диапазона всегда можно получить величину $\eta_{ЦС}$, мало отличающуюся от 1. Поэтому принимаем

$$P_{ВЫХ \max} = P_1 = 30 \text{ Вт.}$$

Как правило, изготовители транзисторов указывают некоторые типовые экспериментальные данные. Воспользуемся ими. Тогда при $f' = 50$ МГц, $P' = 10$ Вт, $K'_P = 3$.

Ориентировочно для возбуждения транзисторов оконечного каскада необходима мощность

$$P_{ВХОК} = \frac{P_1}{K'_P} = \frac{30}{3} = 10 \text{ Вт.}$$

Входная мощность для окончного каскада $P_{ВХОК}$ будет являться выходной мощностью предоконечного каскада $P_{ВЫХПК}$, т.е. $P_{ВЫХПК} = P_{ВХОК}$.

Необходимо определить постоянное напряжение на коллекторе в режиме максимальной мощности $E_{K\max}$, которое складывается из напряжений, полученных от модулятора $U_{\Omega_{\max}} = mE_{ПИТ}$ и источника питания

$$E_{K\max} = E_{ПИТ} (1 + m) = 24 \text{ Вт} \leq E_{K\text{дон.}}$$

Выбор типа транзистора предоконечного каскада определяется не только необходимой величиной мощности $P_{1ПК}$, но и величиной $K_{РПК}$ этого транзистора и напряжением питания его коллекторной цепи. Удобно, чтобы предоконечный каскад мог питаться от того же источника с напряжением $E_{п}$, что и окончный каскад. В отличие от контура окончного каскада здесь при достаточно высоких коэффициентах усиления транзистора по мощности целесообразно предъявлять требование высокого значения КПД контура $\eta_{ЦС}$. Предоконечный транзистор должен обладать мощностью :

$$P_{1ПК} = \frac{P_{ВХОК}}{\eta_{ЦСПК}}$$

Примем $\eta_{ЦС} = 0,7$; тогда

$$P_{1ПК} = 10/0,7 = 14 \text{ Вт.}$$

Такую мощность при высоком $K_{Р}$ можно получить от двух транзисторов КТ904.

На рабочей частоте 50 МГц $K_{Р}$ предоконечного каскада:

$$K_{РПК} = K'_{Р} \left(\frac{f'}{f} \right)^2 = 8 \left(\frac{100}{50} \right)^2 = 32.$$

Мощность на входе транзисторов КТ 904 равна

$$P_{ВХПК} = \frac{P_{1ПК}}{K_{РПК}} = \frac{14}{32} = 0,44 \text{ Вт.}$$

Коллекторное питание этих транзисторов можно осуществлять через обмотку трансформатора. При этом модулируется одновременно окончный и предоконечный каскады, что обуславливает малые нелинейные искажения.

б) Выбор АЭ для автогенератора и промежуточных каскадов 2, 3, 4.

Дальнейшее построение структурной схемы производим следующим образом.

Обратимся к выбору транзистора для автогенератора. Поскольку допустимая нестабильность 10^{-5} , то это обстоятельство определяет необходимость иметь в возбuditеле кварцевую стабилизацию. Кроме того, АГ должен быть маломощным и работать на относительно низкой частоте. В зависимости от

частоты АГ и его выходной мощности определяется число промежуточных каскадов. Если использовать в схеме передатчика два утроителя, то частота возбуждителя будет равна

$$f_{3AD} = \frac{f_{PAB}}{N} = \frac{50}{9} \approx 5,5 \text{ МГц.}$$

Для автогенератора следует выбрать высокочастотный маломощный транзистор, имеющий $f_T > (20 - 50) f_p$, т.е. транзисторы типа КТ 334, КТ 324 и др. Выбираем транзистор для АГ КТ331 с допустимой мощностью рассеяния 0,015 Вт и $f = 250 \text{ МГц}$.

Положим, что выходная мощность нашего АГ должна быть равной 0,002 Вт. Тогда между возбуждителем и предоконечным каскадом можно поставить три каскада: два маломощных утроителя и один относительно мощный усилительный каскад. Таким образом, ориентировочно структурная схема передатчика будет иметь вид:

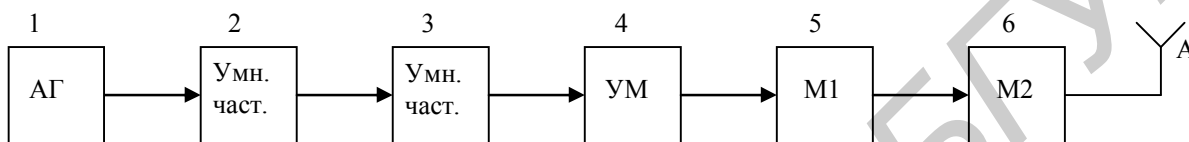


Рис. 1.2. Структурная схема передатчика

Возбуждать транзисторы предоконечного каскада можно от усилителя, который должен обеспечить мощность:

$$P_{1VM_4} = \frac{P_{BX_{ПК}}}{\eta_{УС_{УМ_4}}} = \frac{0,44}{0,4} \approx 1 \text{ Вт.}$$

Такую мощность на частоте 50 МГц можно получить с помощью транзистора КТ 602. Этот транзистор на частоте 50 МГц имеет высокое усиление по мощности:

$$K_P = K_P' \left(\frac{f_r'}{f} \right)^2 = 6 \cdot 4 = 24.$$

На возбуждение каскада требуется мощность

$$P_{BX_4} = \frac{P_{1VM_4}}{K_P} = \frac{1 \text{ Вт}}{24} = 0,05 \text{ Вт.}$$

Теперь перейдём к выбору транзисторов для умножителей. Для большинства схем, работающих в умножительном режиме, можно считать, что при частоте возбуждения $f < 0,3 \frac{f_T}{\beta_0}$ выходная мощность и коэффициент усиления по мощности транзистора падают в N раз:

$$P_N = \frac{P_1}{N}, \quad K_{PN} = \frac{K_P}{N}.$$

В режиме умножения КПД коллекторного контура должен быть обязательно невысоким, т.к. в противном случае из-за низкой нагруженной добротности контура будут плохо отфильтровываться соседние гармоники.

При построении структурной схемы важным с точки зрения унификации является применение по возможности однотипных транзисторов. Если принять $\eta_{УМ} = 0,7$, то транзистор умножителя должен обеспечить мощность

$$P_{1УМ3} = \frac{P_{ВХ4}}{\eta_{УМ}} = \frac{0,04}{0,7} \approx 0,06 \text{ Вт.}$$

В качестве активного элемента в утроителе можно использовать транзистор КТ 602:

$$P_{N=3} = \frac{1}{3} \approx 0,3 \text{ Вт} > 0,06 \text{ Вт};$$

$$K_{P_{N=3}} = \frac{24}{3} = 8.$$

На возбуждение третьего каскада (второго умножителя) требуется мощность

$$P_{ВХ3} = \frac{0,06}{8} \approx 0,0075 \text{ Вт.}$$

Примем $\eta_{УЧ2} = 0,7$. Транзистор первого умножителя должен вырабатывать мощность

$$P_{1УМ2} = \frac{0,0075}{0,7} \approx 0,01 \text{ Вт.}$$

Рассмотрим возможность использования в качестве активного элемента транзистор КТ 331. Как известно, транзистор следует выбирать такой, у которого допустимая мощность рассеивания того же порядка, что и колебательная $-P_1$. У транзистора КТ 331

$$P_{доп} = 0,015 \text{ Вт.}$$

Если применить формулу

$$P_{РАС} = P_1 \frac{(1-\eta_1)}{\eta_1}$$

и принять $\eta_1 = 0,5$, что справедливо для большинства полупроводниковых приборов ($\eta_1 = 0,5 \dots 0,7$), то

$$P_{РАС} = P_{доп} = P_1 = 0,015 \text{ Вт,}$$

следовательно, в усилительном режиме транзистор обеспечит

$$P_1 = 0,015 \text{ Вт, } K_P = 8.$$

Поскольку в умножителе P_1 и K_P уменьшаются в N раз, то

$$P_{1УЧ2} \approx 0,005 \text{ Вт, } K_{P_{УЧ2}} \approx 3,$$

$$P_{ВХ_{УЧ2}} = \frac{0,005}{3} = 0,002 \text{ Вт.}$$

Таким образом, в результате расчета структурная схема радиопередатчика ориентировочно будет иметь следующий вид:

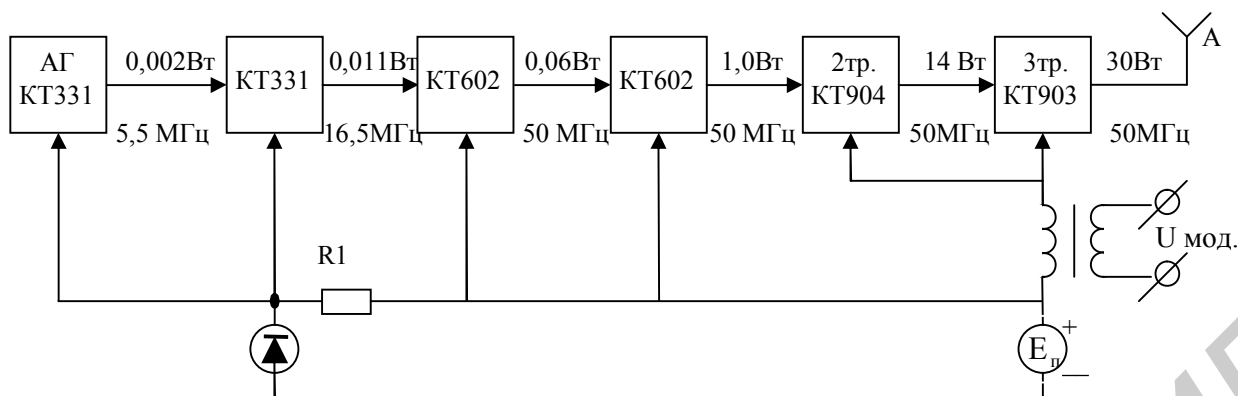


Рис. 1.3. Структурная схема радиопередатчика

Первый умножитель и автогенератор требуют пониженного питания, которое обеспечивается путем включения гасящего резистора. Стабилитрон повышает стабильность напряжения в АГ.

3. Упражнения и задачи

1. Изобразите структурную схему передатчика с частотной модуляцией и поясните назначение ее каскадов. Из каких соображений выбираются активные элементы для окончного каскада?

2. Изобразите структурную схему передатчика с фазовой модуляцией и поясните назначение отдельных ее каскадов. В чем преимущества и недостатки такого передатчика?

3. По каким причинам используют схемы суммирования мощностей активных элементов, отдельных радиочастотных блоков? Назовите способы сложения мощностей.

4. С какой целью используется в передатчиках режим синхронизации генераторов? Изобразите схему выходного каскада РПУ, в которой применяется этот режим.

5. Что такое радиосигнал и какими параметрами он характеризуется?

6. Чем отличаются аналоговые и цифровые радиопередающие устройства?

7. Перечислите достоинства, недостатки и области применения проводных и беспроводных радиопередающих устройств.

8. В чем состоит процесс модуляции? Перечислите виды модуляции, их основные достоинства и недостатки.

9. В чем схожесть и отличие процессов модуляции и манипуляции? Перечислите области применения манипуляции.

10. Перечислите радиотехнические системы, в которых используются радиопередающие устройства.

11. Приведите классификацию радиопередающих устройств, принятую в странах СНГ.

12. Перечислите основные параметры радиопередатчиков и объясните их значение для радиотехнической системы.
13. Что такое КПД РПДУ? Как он определяется? Какие меры необходимо применить для его повышения?
14. В каких радиопередающих устройствах используется умножение частоты?
15. Рассчитайте коэффициент усиления радиопередатчика по мощности в раз-ах и децибелах при мощности сигнала, передаваемого в антенну $P_A = 15$ кВт, коэффициент $K_{A\Phi Y} = 0,75$ и мощности возбудителя $P_{ВОЗБ} = 10$ мВт.
16. Изобразите структурную схему многокаскадного передатчика РЛС. Поясните необходимость многокаскадного построения РПДУ.
17. Сформулируйте технические требования и составьте структурную схему передатчика для звукового сопровождения телевизионных программ.
18. Рассчитайте коэффициент усиления радиопередатчика по мощности в раз-ах и децибелах при коэффициенте усиления первого каскада 7 дБ, второго — 10 дБ, третьего — 5 дБ. Составьте структурную схему РПДУ магистральной радиосвязи, работающего с однополосной модуляцией.
19. Составьте структурную схему РПДУ цифровой радиорелейной линии и сформулируйте технические требования к передатчику.
20. Изобразите структурную схему абонентского РПДУ сотовой системы радиосвязи цифрового типа. Поясните принцип построения сотовой системы радиосвязи, распределение в ней частоты.
21. Сформулируйте технические требования и нарисуйте структурную схему УКВ ЧМ передатчика стереофонического радиовещания.
22. Нарисуйте структурную схему радиопередатчика-ретранслятора при многостанционном доступе с частотным разделением каналов.
23. Сформулируйте технические требования и составьте структурную схему передатчика цифрового радиотелефона.
24. Составьте структурную схему радиовещательного ЧМ-передатчика, работающего по схеме преобразования фазовой модуляции в частотную, если несущая частота 45 МГц, девиация частоты 50 кГц, полоса модулирующих частот 30 – 15000 Гц, девиация фазы 2,5 радиана. Выходная мощность передатчика 1 кВт.
25. Сформулируйте технические требования и составьте структурную схему передатчика оптического диапазона.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

Электронные режимы генераторов с внешним возбуждением (ГВВ)

1. Общие сведения

Генератор с внешним возбуждением (ГВВ) или независимым возбуждением (ГНВ) предназначен для преобразования энергии источника питания в энергию высокочастотных колебаний. Это название генератор получил в силу того, что свои функции он выполняет только при подаче на его вход сигнала

определённой амплитуды и частоты от внешнего, независимого источника колебаний. ГВВ состоит из активного элемента (АЭ), системы возбуждения (СВ), нагрузочной системы (НС), источников питания и смещения E_{Π} и $E_{СМ}$ и цепей блокировки $C_{ВХ\phi}$ и $C_{ВЫХ\phi}$. СВ содержит источник возбуждения и входную цепь согласования, обеспечивает формирование гармонического входного напряжения или входного тока и подачу последних на АЭ. В НС входят цепь согласования и нагрузка, которая обеспечивает формирование выходного сигнала и подачу его в антенну или на вход последующего каскада. Обобщённая схема ГВВ имеет следующий вид:

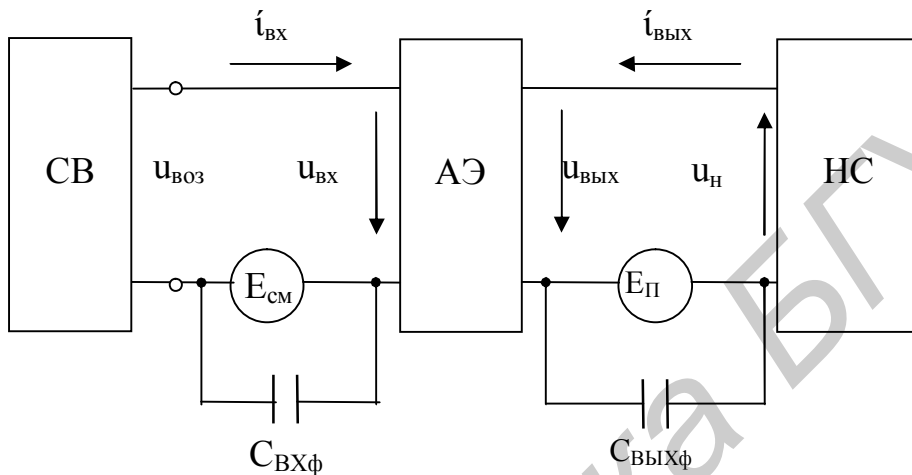


Рис. 2.1. Обобщенная схема ГВВ

Во входной цепи АЭ действуют следующие напряжения: напряжение возбуждения $u_{ВОЗ} = U_{ВХ} \cos \omega t$, управляющее процессом преобразования энергии источника постоянного тока E_{Π} в энергию ВЧ-колебаний; постоянное напряжение смещения $E_{СМ}$, определяющее выбор рабочей точки на статистической проходной характеристике АЭ. Источник периодического возбуждения $u_{ВОЗ}$ и источник постоянного смещения $E_{СМ}$ создают во входной цепи АЭ ток $i_{ВХ}$, образующий на управляющем электроде АЭ мгновенное напряжение $u_{ВХ} = E_{СМ} + U_{ВХ} \cos \omega t$. Под действием этого напряжения и включенном источнике питания выходной цепи E_{Π} на выходе АЭ появляется выходной ток $i_{ВЫХ}$. Этот ток проходит по цепям нагрузочной системы и образует падение напряжения $U_{Н}$, в результате чего на выходе АЭ появляется напряжение $u_{ВЫХ} = E_{\Pi} - u_{Н} = E_{\Pi} - U_{Н} \cos \omega t$.

Основными режимами работы АЭ ГВВ являются: недонапряжённый (НР), граничный (ГР) и перенапряжённый (ПР). ГВВ с постоянной амплитудой сигнала на выходе, как правило, работает в критическом режиме, так как этот режим характеризуется наилучшими энергетическими показателями. Граничный режим часто именуют критическим, поскольку он очень критично реагирует на

изменение напряжений U_{BX} , E_{CM} , E_{II} и сопротивление нагрузки Z_H . При увеличении U_{BX} , E_{CM} и уменьшении E_{II} сопротивления R_{II} генератор «сваливается» в перенапряжённый, а в противоположном случае – в недонапряжённый режим.

Очень часто ГВВ называют усилителем, потому что на его выходе практически всегда выше и ток, и напряжение, в конечном счёте и мощность. Кроме того, первая гармоника тока и напряжения на выходе по форме совпадает с входным сигналом. Поэтому важнейшим показателем ГВВ является коэффициент усиления по мощности K_p . Однако рассматриваемому устройству больше подходит название генератор, поскольку его выходной ток по форме не совпадает с входным сигналом, а генерирует периодическую последовательность косинусоидальных импульсов, которая может быть представлена рядом Фурье. Постоянная составляющая и амплитуды косинусоидального импульса легко определяются с помощью коэффициента пропорциональности $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots$, которые зависят только от угла отсечки θ . Их значение определяют по таблицам либо по графикам.

В зависимости от угла отсечки различают следующие классы работы ГВВ: A – при $\theta = 180^\circ$; AB – при $90^\circ < \theta < 180^\circ$; B – при $\theta = 90^\circ$; C – при $\theta < 90^\circ$. Класс D называется ключевым режимом.

Баланс мощностей для выходной цепи имеет вид

$$P_0 = P_1 + P_{PAC},$$

где P_0 – мощность, потребляемая от источника питания;

P_{PAC} – мощность, рассеиваемая в виде тепла на выходном электроде АЭ;

$P_1 = 0,5U_H I_{ВЫХ1}$ – полезная мощность на выходе генератора, где

$I_{ВЫХ1}$ – первая гармоника выходного тока ГВВ.

Баланс мощностей во входной цепи имеет вид

$$P_{ВХ1} = P_{C0} + P_{PACВХ},$$

где $P_{ВХ1}$ – мощность источника возбуждения;

P_{C0} – мощность источника смещения;

$P_{PACВХ}$ – мощность, рассеиваемая в виде тепла на управляющем электроде АЭ.

Электронный КПД выходной цепи АЭ:

$$\eta_{Э} = \frac{P_1}{P_0},$$

а полный КПД АЭ:

$$\eta_{AB} = \frac{P_1}{P_0 + P_{C0} + P_{ВХ1}},$$

Коэффициент усиления АЭ по мощности в ГВВ:

$$K_P = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}},$$

Отношение $g = \frac{I_{ВЫХ1}}{I_{ВЫХ0}}$ называют коэффициентом формы выходного тока.

Отношение $\xi = \frac{U_{ВЫХ}}{E_{П}}$ выражает коэффициент использования напряжения питания выходной цепи.

Из вышеизложенного следует, что

$$\eta_{\mathcal{D}} = \frac{1}{2} \frac{I_{ВЫХ1}}{I_{ВЫХ0}} \frac{U_{ВЫХ}}{E_{П}} = \frac{1}{2} g \xi.$$

В режиме класса *A* максимальное значение $g = \xi = 1$ и теоретически КПД не может быть больше 0,5.

В режиме с отсечкой максимальное значение $\xi = 1$, а $g \rightarrow 2$, т.е. теоретически $\eta_{\mathcal{D}} = 1$. Из сказанного ясно, что усилитель с высоким КПД должен работать с отсечкой тока, т.е. в нелинейном режиме.

Полную информацию о режимах работы АЭ может дать динамическая характеристика, т.е. зависимость, которая однозначно связывает мгновенные значения выходных тока и напряжения.

График аппроксимированной динамической выходной вольт-амперной характеристики изображен на рис. 2.2, а. Участок I соответствует недонапряженной области, участок II – перенапряженной, точка А – граничной (критической).

На рис. 2.2, б показаны временные зависимости $i_{ВЫХ}(\omega t)$ при различных значениях выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ и постоянном угле отсечки $\theta = 90^\circ$. Начало временных отсчетов ($\omega t = 0$) для каждого режима указано на рисунках.

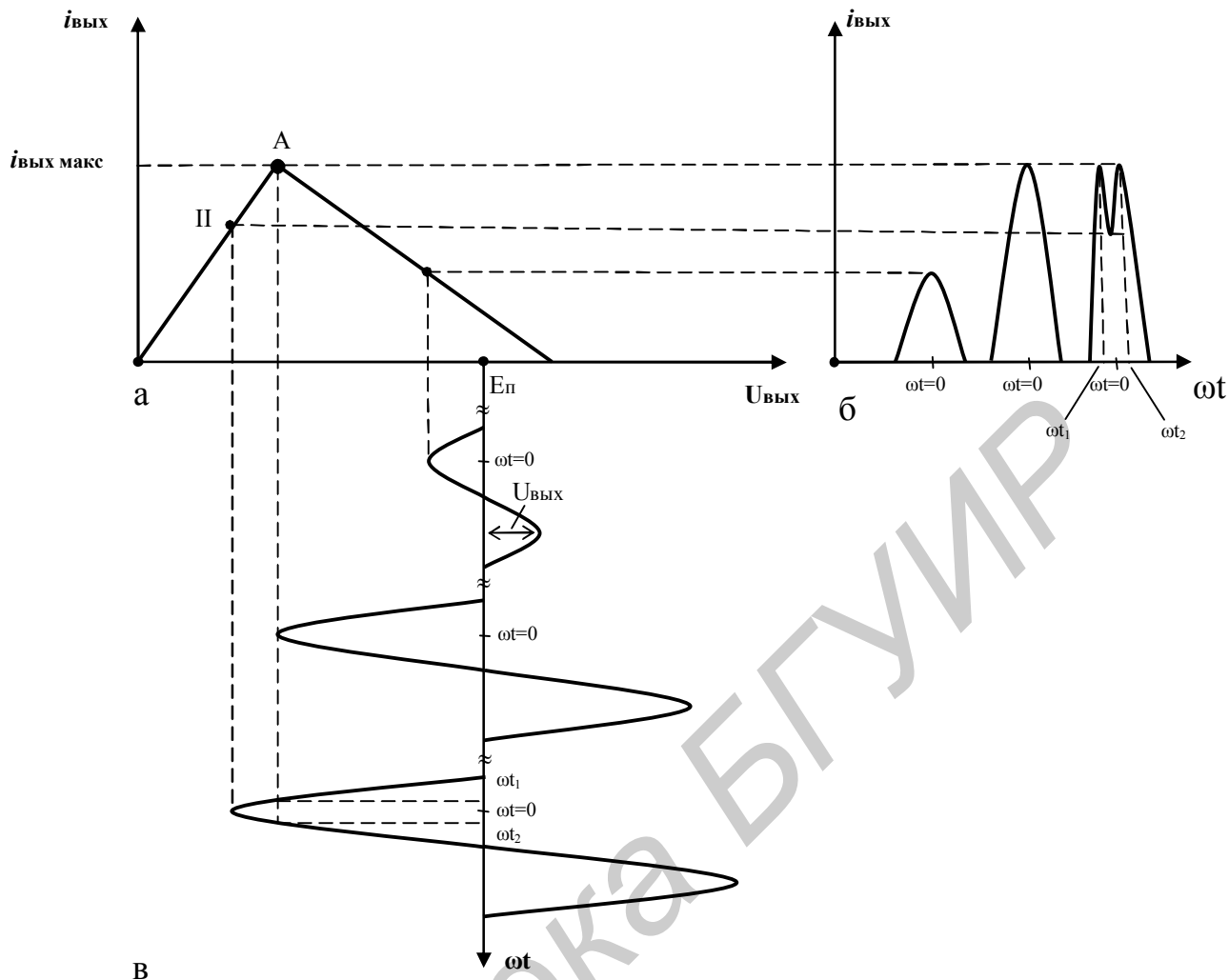


Рис. 2.2. Динамическая характеристика (а) и форма выходного тока (б) в различных режимах работы активного элемента (в)

В недонапряженном режиме импульс $i_{\text{ВЫХ}}(\omega t)$ имеет форму отрезка косинусоиды и его амплитуда возрастает с ростом $U_{\text{ВЫХ}}$. В граничном режиме амплитуда импульса выходного тока максимальна. В недонапряженном режиме в импульсе $i_{\text{ВЫХ}}(\omega t)$ появляется провал, увеличивающийся с ростом $U_{\text{ВЫХ}}$.

Для расчёта токов статические характеристики пригодны лишь для безынерционных активных элементов, из которых только лампы и полевые транзисторы в большей части их рабочего диапазона безынерционны. Для биполярных транзисторов (БТ) интервал частот, где их поведение описывается статическими характеристиками, составляет несколько процентов от всей области ра-

бочих частот. Частотные свойства БТ наглядно представляют частотные характеристики модуля $|\dot{\beta}|$ и фазового угла φ_β , которые представлены на рис. 2.3.

Весь диапазон рабочих частот удобно разделить на три области. В области низких частот ($0 \leq \omega \leq 0,3\omega_\beta$) БТ можно рассматривать как безынерционный активный элемент с $|\dot{\beta}| = \beta^\circ$ и $\varphi_\beta = 0$. В диапазоне средних частот ($0,3\omega_\beta < \omega \leq 3\omega_\beta$) БТ – инерционный электронный прибор. По мере увеличения частоты в этом диапазоне значение $|\dot{\beta}|$ уменьшается, а φ_β – увеличивается.

При $|\dot{\beta}| = 0,707$ и $\varphi_\beta = 45^\circ$. В диапазоне средних частот $\omega > 3\omega_\beta$ БТ также инерционен. Отдельные параметры БТ связаны следующими соотношениями:
 $B = 15 \dots 30$, $\tau_\beta = B\tau_T$, $S = BS_{BX}$, $f_\alpha = f_T + f_\beta$.

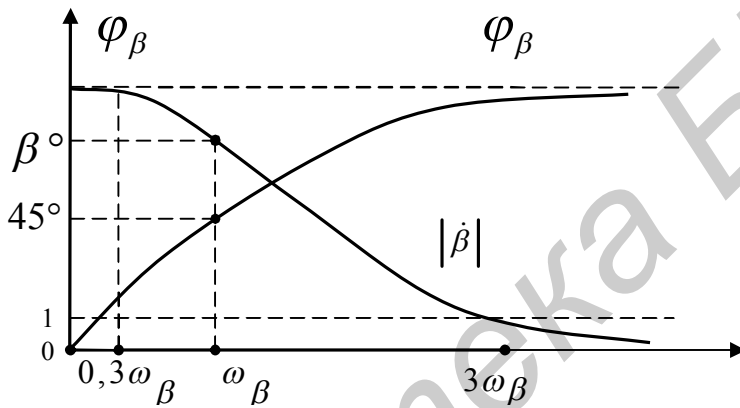


Рис. 2.3. Частотные характеристики биполярного транзистора

2. Пример расчёта ГВВ

Исходные данные:

Рассчитать генератор мощностью 10 Вт в диапазоне частот 25 ... 50 МГц; номинальный режим – граничный, напряжение питания 24 В.

Выбираем транзистор 2Т903А со следующими параметрами:

$$f_t = 120 \text{ МГц}, P_{\text{дон}} = 30 \text{ Вт}, S_{mp} = 0,4 \text{ А/В}, R_{y_{\text{э}0}} = 0,08 \text{ кОм},$$

$$r_{\text{б}} = 2 \text{ Ом}, C_{\text{к}} = 180 \text{ пФ}, C_{\text{ка}} = (0,2 - 0,3) \cdot C_{\text{к}}, C_{\text{э}} = 1200 \text{ пФ}, E_{\text{к}_{\text{дон}}} = 60 \text{ В},$$

$$I_{\text{к}_{\text{дон}}} = 3 \text{ А}, U_{\text{к}_{\text{дон}}} = 60 \text{ В}, U_{\text{кб}_{\text{дон}}} = 3 \text{ В}, L_{\text{б}} = 5 \text{ нГн}, h_{21_{\text{э}0}} = 15 \dots 70.$$

Полагаем, что транзистор работает в режиме класса В, $\theta = 90^\circ$.

Расчет коллекторной цепи

1. Амплитуда переменного напряжения

$$U_{K_{cp}} = E_K \left(0,5 + 0,5 \sqrt{1 - \frac{8P_1}{\alpha_1(\theta) S_{cp} \cdot E_K^2}} \right);$$

$$U_{K_{cp}} = 24 \left(0,5 + 0,5 \sqrt{1 - \frac{810}{0,5 \cdot 0,4 \cdot 24^2}} \right) = 19,2 \text{ В.}$$

2. Максимальное напряжение на коллекторе не должно превышать

$$E_{K_{\max}} = E_K + (1,2 \dots 1,3) U_{K_{cp}} \leq E_{K_{\text{дон}}}; E_{K_{\max}} = 24 + 19,2 \cdot 1,3 = 48,968 \leq 60 \text{ В.}$$

3. Амплитуда первой гармоники тока

$$I_{K_1} = \frac{2P_1}{U_{K_{cp}}}; I_{K_1} = \frac{2 \cdot 10}{19,2} = 1,04 \text{ А.}$$

4. Постоянная составляющая коллекторного тока

$$I_{K0} = \left[\frac{\alpha_0(\theta)}{\alpha_1(\theta)} \right] \cdot I_K \leq I_{K_{\text{дон}}}; I_{K0} = \left[\frac{0,319}{0,5} \right] \cdot 1,04 = 0,655 < 3 \text{ А.}$$

5. Максимальный коллекторный ток

$$i_{K_{\max}} = \frac{I_{K0}}{\alpha_0(\theta)} \leq I_{K_{\text{максдон}}}; i_{K_{\max}} = \frac{0,655}{0,319} = 2,07 \text{ А} < 3 \text{ А.}$$

6. Максимальная мощность потребляемая от источника питания

$$P_0 = E_K \cdot I_K; P_0 = 24 \cdot 1,04 = 24,96 \text{ Вт.}$$

7. Коэффициент полезного действия коллекторной цепи при коллекторной нагрузке

$$\eta_{\text{э}} = \frac{P_1}{P_0}; \eta_{\text{э}} = \frac{10}{24,96} = 0,401.$$

8. Максимальная рассеиваемая мощность на коллекторе транзистора

$$P_{PAC} = P_0 - P_1;$$

$$P_{PAC} = 24,96 - 10 = 14,96 \text{ Вт} < 30 \text{ Вт.}$$

9. Номинальное сопротивление коллекторной цепи

$$R_K = \frac{U_K}{I_K}; R_K = \frac{19,2}{1,4} = 13,7 \text{ Ом.}$$

Расчет входной цепи

1. Сопротивление между базовым и эмиттерным выводами транзистора при $h_{21\text{э}0} = 30$.

$$R_{\delta} = R_{\varepsilon} = \frac{h_{21\varepsilon 0}}{2\pi \cdot f_m \cdot C_{\varepsilon}} \left(1 - \frac{h_{21\varepsilon 0}}{2\pi \cdot f_m \cdot C_{\varepsilon} \cdot R_{y\varepsilon 0}} \right);$$

$$R_{\delta} = R_{\varepsilon} = \frac{30}{2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 1200 \cdot 10^{-12}} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{30}{2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 1200 \cdot 10^{-12} \cdot 8 \cdot 10^8} \right) \approx 18 \text{ Ом.}$$

2. Сопротивление между коллектором и базой транзистора R1:

$$R_1 = \frac{h_{21\varepsilon 0}}{2\pi \cdot f_m \cdot C_K}; R_1 = \frac{30}{2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 180 \cdot 10^{-12}} \approx 230 \text{ Ом.}$$

3. Коэффициент χ :

$$\chi = 1 + \gamma_1(\theta) \cdot 2\pi \cdot f_K \cdot C_K \cdot R_K;$$

$$\chi = 1 + 0,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 180 \cdot 10^{-12} \cdot 19 \approx 2,3.$$

4. Амплитуда тока базы:

$$I_{\delta 1} = \chi \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(h_{21\varepsilon 0} \cdot \frac{f}{f_m} \right)^2}}{h_{21\varepsilon 0} \cdot \gamma_1(\theta)} \cdot I_{K1}; I_{\delta 1} = 2,3 \cdot \frac{\sqrt{1 + \left(30 \cdot \frac{50}{120} \right)^2}}{30 \cdot 0,5} \cdot 1,04 = 1,9 \text{ А.}$$

5. Напряжение смещения на эмиттерном переходе

$$E_{\delta\varepsilon} = -I_{\delta} \cdot \frac{\gamma_0(\pi - \theta) \cdot R_{\delta M}}{\sqrt{1 + \left(h_{21\varepsilon 0} \cdot \frac{f}{f_m} \right)^2}} + E_{омс};$$

$$E_{\delta\varepsilon} = -19 \cdot \frac{0,5 \cdot 18}{\sqrt{1 + \left(30 \cdot \frac{50}{120} \right)^2}} + 0,7 = -0,7 \text{ В.}$$

6. Постоянные составляющие базового и эмиттерного токов

$$I_{\delta 0} = \frac{I_{K0}}{h_{21\varepsilon 0}}, I_{\delta 0} = \frac{0,65}{30} \approx 0,02 \text{ А,}$$

$$I_{\varepsilon 0} = I_{\delta 0} + I_{K0}; I_{\varepsilon 0} = 0,65 + 0,02 = 0,67 \text{ А.}$$

7. Максимальное обратное напряжение смещения на эмиттерном переходе:

$$E_{\delta\varepsilon} = -I_{\delta} \cdot \frac{(1 + \cos \theta) \cdot R_{\delta M}}{\sqrt{1 + \left(h_{21\varepsilon 0} \cdot \frac{f}{f_m} \right)^2}} + E_{омс};$$

$$E_{\bar{\sigma}_3} = -19 \cdot \frac{18}{\sqrt{1 + \left(30 \cdot \frac{50}{120}\right)^2}} + 0,7 = -2,3 < -4 \text{ В.}$$

8. Значения $L_{BX_{03}}$, $r_{BX_{03}}$, $R_{BX_{03}}$ и $C_{BX_{03}}$:

$$L_{BX_{03}} = L_{\bar{\sigma}} + \frac{L_3}{N}; L_{BX_{03}} = 5 + \frac{5}{2,3} = 7 \text{ нГн};$$

$$r_{BX_{03}} = \frac{\left[(1 + \gamma_1(\theta)) \cdot 2\pi \cdot f_m \cdot C_{\kappa A} \cdot R_{\kappa} \right] \cdot r_{\bar{\sigma}} + r_3 + \gamma_1(\theta) \cdot 2\pi \cdot f_{\kappa} \cdot L_3}{\chi},$$

$$r_{BX_{03}} = \frac{\left[(1 + 0,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-12} \cdot 19) \cdot 2 + 0,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 50 \cdot 10^{-9} \right]}{2,3},$$

$$r_{BX_{03}} \approx 2 \text{ Ом};$$

$$R_{BX_{03}} = \frac{\left[r_{\bar{\sigma}} + (1 + \gamma_1(\theta)) \cdot h_{21\bar{\sigma}0} \right] \cdot r_3}{\chi} - r_{BX_{03}} + R_{\text{дон}} [1 - \gamma_1(\theta)],$$

$$R_{BX_{03}} = \frac{\left[2 + (1 + 0,5 \cdot 30) \cdot 0 \right]}{2,3} - 2 + 18 \cdot 0,5 = 7,9 \text{ Ом.}$$

$$C_{BX_{03}} = \frac{h_{21\bar{\sigma}0}}{2\pi \cdot f_m \cdot R_{BX_{03}}}; C_{BX_{03}} = \frac{30}{2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 18} = 0,002 \text{ мкФ.}$$

9. Резистивная и реактивная составляющие входного сопротивления:

$$r_{BX} = r_{BX_{03}} + \frac{R_{BX_{03}}}{1 + \left(h_{21\bar{\sigma}0} \cdot \frac{f}{f_m} \right)^2}; r_{BX} = 2 + \frac{7,9}{1 + \left(30 \cdot \frac{50}{120} \right)^2} \approx 2 \text{ Ом};$$

$$x_{BX} = 2\pi \cdot f \cdot L_{BX_{03}} - \frac{R_{BX_{03}} \cdot \frac{f}{f_m}}{1 + \left(h_{21\bar{\sigma}0} \cdot \frac{f}{f_m} \right)^2};$$

$$x_{BX} = 2 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^6 \cdot 7 \cdot 10^{-9} + \frac{7,9 \cdot 30 \cdot \frac{50}{120}}{1 + \left(30 \cdot \frac{50}{120} \right)^2} = 6,1 \text{ Ом.}$$

10. Входная мощность

$$P_{BX} = 0,5 \cdot I_{\bar{\sigma}}^2 \cdot r_{BX_{03}}; P_{BX} = 0,5 \cdot 1,9^2 \cdot 2 = 3,6 \text{ Вт.}$$

11. Коэффициент усиления

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}; K_P = \frac{10}{3,6} \approx 3.$$

12. Максимальная мощность, рассеиваемая в транзисторе

$$P_{\text{РАС}} = P_{\text{РАС}_{\text{ВЫХ}}} + P_{\text{ВХ}}; P_{\text{РАС}} = 5,96 + 3,6 = 9,56 \text{ Вт.}$$

3. Упражнения и задачи

1. Изобразите временные диаграммы напряжений и токов для входной и выходной цепей ГВВ, работающего на настроенную нагрузку в классе *A*. Запишите выражения для всех токов и напряжений, а также для выходной и рассеиваемой мощностей и КПД.

2. Определите классы работы ГВВ. Выполните условие задачи 1 для ГВВ, работающего в классе *B*. Почему мощные генераторы работают с отсечкой выходного тока?

3. С помощью временных диаграмм, напряжений и токов во входной и выходной цепях ГВВ и резонансного усилителя, работающих в классе *C*, объясните различие принципа их работы.

4. Постройте импульс выходного тока с помощью динамической характеристики ВАХ ГВВ, работающего в недонапряжённом режиме с учётом отсечки $\theta < 90^\circ$. В каком режиме будет работать генератор при увеличении сопротивления нагрузки?

5. Постройте импульс выходного тока с помощью динамической характеристики ВАХ ГВВ, работающего в критическом режиме с углом отсечки $\theta > 90^\circ$. Как будет изменяться мощность первой гармоники тока АЭ, если уменьшить угол отсечки в интервале от 180 до 120° ?

6. Генератор работает в перенапряжённом режиме. Угол отсечки $\theta = 90^\circ$. Постройте импульс выходного тока с помощью динамической характеристики АЭ. Каким образом надо изменить сопротивления нагрузки АЭ, чтобы получить критический режим?

7. Изобразите эквивалентные схемы биполярного транзистора при открытом и закрытом переходах и построьте векторные диаграммы, поясняющие процессы, происходящие в транзисторе на повышенных частотах. Какие меры применяют для устранения частотной зависимости? Запишите условия коррекции.

8. ГВВ работает на колебательную систему с резонансным сопротивлением 90 Ом . Измерены следующие величины: постоянная составляющая коллекторного тока $0,2 \text{ А}$, напряжение питания коллекторной цепи 35 В , амплитуда коллекторного напряжения 30 В . Определите колебательную мощность и электронный КПД.

9. Постоянная составляющая тока коллектора 1 А , амплитуда коллекторного напряжения 25 В , напряжение питания 27 В , угол отсечки 90° . Определите мощность, рассеиваемую коллектором.

10. Определите амплитуду импульса тока коллектора и его первую гармонику, если амплитуда напряжения возбуждения 1 В, крутизна проходной характеристики АЭ 6 А/В, напряжение смещения на базе равно напряжению запирающего коллекторного тока.

11. Колебательная мощность генератора 20 Вт при амплитуде напряжения на коллекторе 50 В. Определите напряжение смещения и напряжение возбуждения в цепи базы, если угол отсечки коллекторного тока 90° , крутизна проходной характеристики 2 А/В, напряжение запирающего 0,7 В.

12. Определите амплитуду импульса коллекторного тока транзистора, если напряжения питания коллекторной цепи 20 В, крутизна линии критического режима 2 А/В, амплитуда коллекторного напряжения 18 В.

13. Амплитуда анодного напряжения 3000 В. Параметры контура генератора: емкость 500 пФ, индуктивность 200 мкГн, добротность 100, коэффициент включения 1. Определите контурный ток и колебательную мощность.

14. Постоянная составляющая тока коллектора 1 А, амплитуда коллекторного напряжения 25 В, напряжение питания 27 В, угол отсечки коллекторного тока 90° . Определите мощность, рассеиваемую коллектором транзистора.

15. Определите мощность, рассеиваемую анодом лампы ГВВ, электронный, контурный (цепи согласования) и общий КПД, если мощность питания анодной цепи 5 кВт, мощность в нагрузке 4 кВт, амплитуда напряжения на контуре (цепи согласования) 3 кВ, резонансное сопротивление нагруженного контура 20 кОм.

16. Установите возможность использования транзистора с допустимой суммарной мощностью потерь на электродах 2 Вт, если амплитуда коллекторного напряжения 20 В, напряжение питания коллектора 30 В, коллекторная нагрузка 50 Ом, постоянная составляющая тока коллектора 0,3 А, допустимая мощность, рассеиваемая в цепи базы - 0,3 В.

17. ГВВ в граничном режиме при угле отсечки анодного тока 90° имеет колебательную мощность 5 Вт. Какая максимальная мощность может быть получена в режиме удвоения (утроения) частоты при неизменном напряжении питания анода?

18. ГВВ работает в граничном режиме на нагрузку с эквивалентным сопротивлением 2 кОм при угле отсечки 90° и постоянной составляющей выходного тока 0,1 А. Определите высокочастотную выходную мощность на первой гармонике.

19. Генератор работает в критическом режиме при напряжениях смещения минус 100 В и сдвига аппроксимированной ВАХ минус 70 В. Определите постоянную составляющую анодного тока, если крутизна выходной характеристики 10 мА/В, а входное высокочастотное напряжение 120 В.

20. Изобразите входную цепь транзисторного ГВВ по схеме с общим эмиттером, работающего с нулевым смещением. Почему транзисторные усилители мощности часто используются в режимах с нулевым смещением?

21. Определите амплитуду импульса коллекторного тока, если амплитуда напряжения возбуждения 1 В, крутизна проходной характеристики транзистора

6 A/V, напряжение смещения на базе равно напряжению запирающего коллекторного тока.

22. Ламповый генератор работает в критическом режиме с углом отсечки 90° . Как изменится электронный КПД генератора при уменьшении амплитуды напряжения возбуждения в два раза?

23. Удвоитель частоты работает в недонапряжённом режиме с углом отсечки 60° . Как изменится величина колебательной мощности, если установить угол отсечки 90° , сохранив прежними амплитуду импульса тока и напряжённость режима?

24. Транзисторный удвоитель частоты работает с углом отсечки 60° . Как изменится величина колебательной мощности, если установить угол отсечки 90° , сохранив прежними амплитуду импульса коллекторного тока и сопротивление нагрузки?

25. Транзисторный генератор работает в критическом режиме с углом отсечки 90° . Как изменится электронный КПД и колебательная мощность при уменьшении амплитуды напряжения возбуждения на 20 %?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 3

Цепи согласования ГВВ

1. Общие сведения

На данном практическом занятии будут рассмотрены особенности построения пассивных цепей, устанавливаемых на входе и выходе АЭ в ГВВ. Между источником ВЧ-сигнала, АЭ и нагрузкой включаются цепи согласования (ЦС), которые разделяются на входные, межкаскадные и выходные.

В качестве цепей согласования, особенно в мощных каскадах, используются резонансные ЦС. В маломощных, транзисторных каскадах используются также апериодические и дроссельные ЦС. Важнейшей характеристикой ЦС является КПД $\eta_{ЦС} = \frac{P_n}{P_{ВХЦС}}$, который учитывает потери мощности. Для работы

АЭ в оптимальном (критическом) режиме в выходную цепь включается сопротивление нагрузки $R_{н\text{кр}}$, которое, однако, может отличаться от реальной нагрузки Z_n . Для выходных каскадов Z_n – сопротивление антенны, пересчитанное ко входу ЦС, для промежуточных – входное сопротивление последующего каскада. Первая задача ЦС – преобразование заданного комплексного сопротивления Z_n в сопротивление $R_{н\text{кр}}$. Вторая задача – фильтрация гармоник. Для реализации расчетных режимов АЭ ЦС должна быть такой, чтобы входное напряжение или входной ток следующего каскада были близки к гармоническим. Кроме того, антенне уровень гармоник должен удовлетворять ЭМС. Различают две по-

становки задачи согласования АЭ: с нагрузкой на фиксированной частоте и в заданной полосе частот.

Вначале рассмотрим простые цепи согласования. Под такой ЦС будем понимать колебательную систему, в емкостную или индуктивную ветви которой включено сопротивление нагрузки Z_H . Из электротехники известно:

1. Реактивная составляющая внутреннего сопротивления генератора и сопротивления нагрузки должны быть сведены к нулю, что может быть достигнуто включением в схему компенсирующих реактивностей соответствующих знаков.

2. Внутреннее сопротивление $R_{вн}$ должно быть равно входному характеристическому сопротивлению четырехполюсника.

3. Сопротивление нагрузки должно быть равно выходному характеристическому сопротивлению четырехполюсника.

В общем случае эквивалентную схему простой цепи согласования можно представить в виде, изображенном на рис. 3.1.

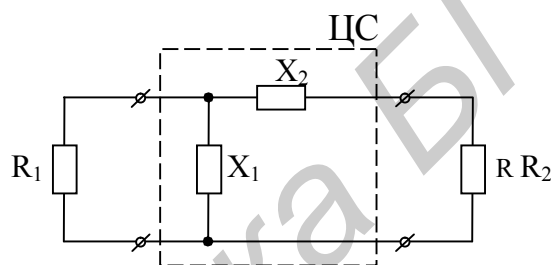


Рис. 3.1. Эквивалентная схема простой цепи согласования

Согласно второму закону Кирхгофа, можно записать уравнение

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{jx_1} = \frac{1}{R_2 + jx_2},$$

Решением этого уравнения будут следующие соотношения:

$$R_1 = \frac{R_2^2 + X_2^2}{R_2}, \quad X_1 = \frac{R_2^2 + X_2^2}{X_2}; \quad \frac{X_2}{R_2} = \frac{R_1}{X_1} = Q, \quad X_1 \cdot X_2 = R_1 \cdot R_2,$$

где Q – добротность последовательной X_2 , R_2 или эквивалентной ей параллельной цепочки.

Применение приведенных формул рассмотрим на примере межкаскадной цепи согласования. В такой цепи

$$R_1 = R_{ВЫХ_1} = \frac{U_{ВЫХ_1}}{I_{ВЫХ_1}}, \quad R_2 = R_{ВХ_2} = \frac{U_{ВХ_2}}{I_{ВХ_2}}, \quad X_1 = \omega L, \quad X_2 = \frac{1}{\omega C_1},$$

где $I_{ВЫХ}$, $U_{ВЫХ}$, $R_{ВЫХ}$, – соответственно ток, напряжение, сопротивление на выходе активного элемента первого каскада;

$I_{ВХ_2}$, $U_{ВХ_2}$, $R_{ВХ_2}$ – соответственно ток, напряжение, сопротивление на входе активного элемента второго каскада;

L_1, C_1 – соответственно индуктивность и емкость цепи согласования (например, параллельный колебательный контур);
 ω – значение частоты колебаний сигнала.

Условием полного согласования на частоте ω будет равенство

$$R_{\text{ВЫХ1}} = \frac{\rho^2}{R_{\text{ВХ2}}} = \rho Q = R_{\text{РЕЗ}},$$

где $\rho = X_1 = X_2$ – волновое сопротивление контура;

$Q, R_{\text{РЕЗ}}$ – соответственно добротность и резонансное сопротивление контура.

Согласующую цепь называют инвертирующей, если выполняется соотношение $\dot{Z}_{\text{ВХ}} = \rho^2 / \dot{Z}_{\text{Н}}$, где $\dot{Z}_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} + jX_{\text{ВХ}}$ – входное сопротивление ЦС,

$\dot{Z}_{\text{Н}} = R_{\text{Н}} + jX_{\text{Н}}$ – сопротивление нагрузки; ρ – характеристическое сопротивление ЦС.

ЦС называют трансформирующей, если выполняется условие $\dot{Z}_{\text{ВХ}} = n_T^2 \cdot \dot{Z}_{\text{Н}}$, где n_T – коэффициент трансформации. Особенность трансформирующих цепей: входное сопротивление изменяется пропорционально изменению сопротивления нагрузки.

Примером инвертирующей цепи является Г-образный согласующий четырехполюсник при $Q \gg 1$, рассмотренный выше. Более сложные инвертирующие цепи – это П- и Т-образные звенья (рис. 3.2, а, б). Подобные цепи инвертируют сопротивление при выполнении соотношений $X_1 = X_2 = -X_3$, при этом $\rho = |X|$.

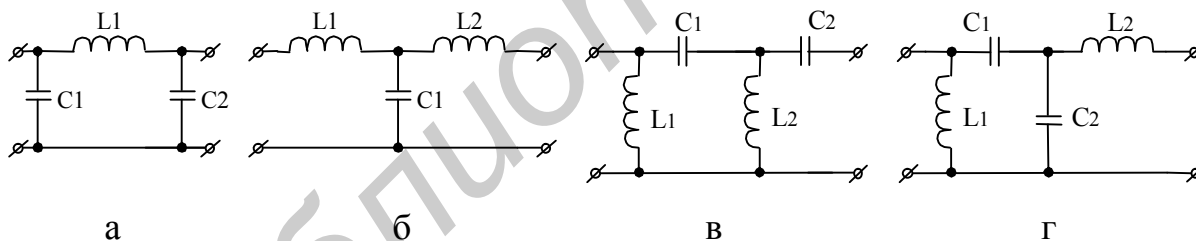


Рис. 3.2. Примеры инвертирующих и трансформирующих ЦС

На рис. 3.2, в, г изображены 2 варианта трансформирующих ЦС. Условие $\dot{Z}_{\text{ВХ}} = n_T^2 \cdot \dot{Z}_{\text{Н}}$ выполняется, если элементы цепи удовлетворяют соотношениям

$$X_1 = -X_2 = (n_2 + 1)X_3 = -n_T X_4.$$

Если требуется согласование в некоторой полосе частот или желательно получить большую крутизну скатов АЧХ-усилителя, рекомендуется использовать сложные ЦС, которые обычно используются в оконечных каскадах, поэтому они называются сложными схемами выхода. Последняя представляется в виде системы двух связанных контуров – антенного, с элементами настройки, и промежуточного (коллекторного, анодного). В качестве элементов связи между

контурами могут выступать конденсатор, катушка индуктивности или взаимная индуктивность между катушками двух контуров. Один из перечисленных вариантов приведён на рис. 3.3.

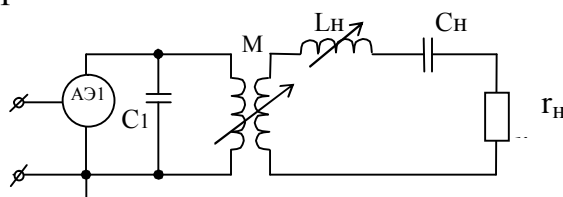


Рис. 3.3. Сложная схема выхода

В радиотехнических системах передатчики работают в широком диапазоне частот. Широкополосными называют усилители, относительная рабочая полоса частот которых составляет десятки процентов и больше, т.е. отношения превышает 2. Широкополосные ЦС выполняют либо на основе фильтров из LC-элементов, либо на трансформаторах или трансформаторах–линиях.

Если отношение не превышает 3...5, то ЦС несложно выполнить на LC ФНЧ. Простейший ФНЧ-преобразователь представляет собой последовательное соединение Г-образных цепочек, как показано на рис. 3.4.

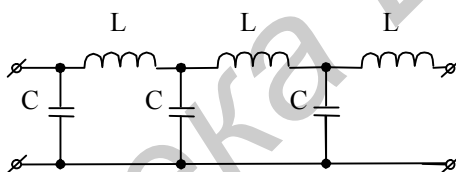


Рис. 3.4. Согласующая цепь на реактивных LC-элементах

Проектирование ЦС на базе ФНЧ осуществляется по методикам проектирования фильтров. Максимальные рабочие частоты определяются возможностью создания сосредоточенных LC-элементов и составляют несколько гигагерц.

Трансформаторы с магнитной связью между обмотками могут выполнять одну из функций ЦС – преобразования сопротивлений при отношении $f_{\max} / f_{\min} \leq 50$ на частотах примерно до 10 МГц.

Трансформатор–линия представляет собой тороидальный или ферритовый стержень с двумя обмотками. Обмотки соединены таким образом, что образуют двухпроводную линию передачи, по которой распространяется бегущая волна от источника колебаний к нагрузке. В трансформаторе, показанном на рис. 3.5, волна распространяется по линии от клем 1 – 3 к клеммам 2 – 4. Если к клеммам 1–3 подключить источник колебаний, а к клеммам 2–4 нагрузку, то коэффициент $N = 1$. Чтобы получить $N \neq 1$, применяют последовательное или параллельное включение трансформаторов.

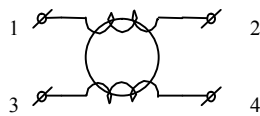


Рис. 3.5. Схематическое изображение трансформатора-линии

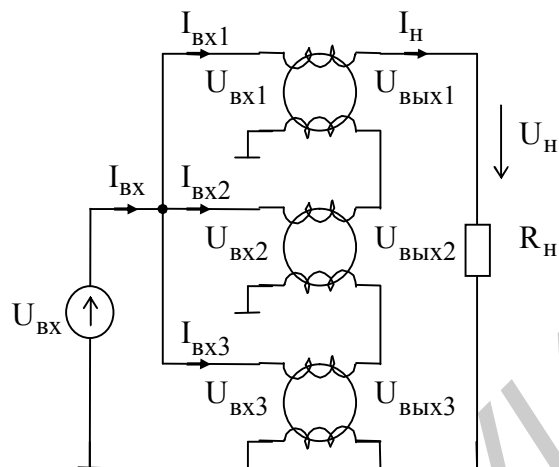


Рис. 3.6. Пример включения

В схеме (рис. 3.6) входы трёх трансформаторов-линий соединены параллельно, а выходы – последовательно. Из рисунка наглядно видно, что ток в нагрузке $I_H = \frac{I_{BX}}{3}$, а амплитуда напряжения в нагрузке $U_H = 3U_{BX}$. Учитывая эти

соотношения, получим, что входное сопротивление $R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{R_H}{9}$. Рассматри-

ваемый трансформатор понижающий с коэффициентом трансформации $N = \frac{1}{9}$.

Применяя другие варианты включения, можно получить повышающий трансформатор с целым или дробным N .

2. Примеры расчета входных цепей согласования ГВВ СВЧ и ФНЧ-трансформатора

Пример 1. Рассчитать входную цепь согласования ГВВ СВЧ, если известна входная проводимость транзистора на рабочей частоте $Y_{BX} = 0,02 - j0,05$ см.

Решение. Для ЦС полупроводниковых усилителей мощности СВЧ применяют одно-, двухшлейфовые, четвертьволновые и другие преобразователи сопротивлений. Топология ЦС СВЧ одношлейфового и четвертьволнового преобразователя показана на рис. 3.7.

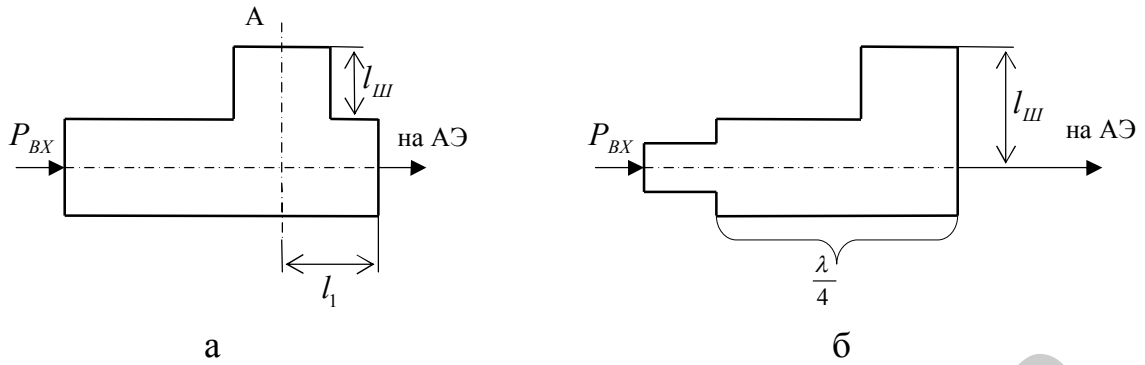


Рис. 3.7. Топология ЦС СВЧ одношлейфового (а) и четвертьволнового (б) преобразователей

Как известно, соотношение для входной проводимости линии без потерь, $Y_{Л}$ нагруженной на проводимость, имеет вид:

$$\dot{Y}_{Л} = \frac{1}{\rho} \frac{\dot{Y}_H \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{Л}} l\right) + \gamma \frac{1}{\rho} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{Л}} l\right)}{\frac{1}{\rho} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_{Л}} l\right) + \gamma \dot{Y}_H \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_{Л}} l\right)},$$

где ρ – волновое сопротивление линии, $\lambda_{Л}$ – длина волны в линии, l – длина линии, Y_H – проводимость нагрузки.

В качестве ЦС для нашего случая выбираем ЦС, изображённую на рис. 3.7, б. Мнимую часть скомпенсируем соответствующим выбором длины шлейфа $l_{ш}$. Входная проводимость разомкнутого ($\dot{Y}_H = 0$) шлейфа будет равна

$$\dot{Y}_{ш} = B_{ш} = j \frac{1}{\rho_{ш}} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_{Л}} l_{ш}\right),$$

где $\rho_{ш}$ – волновое сопротивление шлейфа.

В соответствии с условиями компенсации реактивности

$$B_{ш} = -B_{ВХ} ;$$

т.е.
$$\frac{1}{\rho_{ш}} \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_{Л}} l_{ш}\right) = 0,75,$$

откуда
$$\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda_{Л}} l_{ш}\right) = 0,5 \rho_{ш}.$$

Если $\rho_{ш} = 50$ Ом, то $\frac{l_{ш}}{\lambda_{Л}} = 0,24$. Волновое сопротивление четвертьволнового преобразователя рассчитаем, воспользовавшись формулой

$$\text{при } l = \frac{\lambda_{\text{л}}}{4}, \dot{Y}_{\text{л}} = \frac{1}{\rho_{\text{ш}}^2 \dot{Y}_{\text{н}}}, \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_{\text{ш}}^2 \dot{Y}_{\text{н}}}.$$

Так как $\dot{Y}_{\text{л}} = \frac{1}{\rho} = 0,02$, то $\rho_{\text{ш}} = \sqrt{\frac{\rho}{0,02}} = 50 \text{ Ом}$.

Пример 2. Рассчитать ФНЧ-трансформатор: граничные частоты $f_{\text{н}} = 25 \text{ МГц}$, $f_{\text{в}} = 50 \text{ МГц}$; нагрузочное сопротивление $R_{\text{нном}} = 14 \text{ Ом}$; входное сопротивление $R_{\text{вхном}} = 7 \text{ Ом}$; допустимая неравномерность АЧХ $\Delta\alpha < 0,05 \text{ дБ}$.

Решение. Выбираем схему ФНЧ-трансформатора (рис. 3.8).

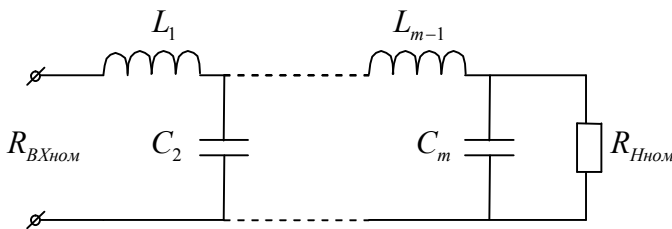


Рис. 3.8. Схема ФНЧ-трансформатора

1) Определяем $r = \frac{R_{\text{нном}}}{R_{\text{вхном}}} = 2$; $K_f = \frac{f_{\text{max}}}{f_{\text{min}}} = \frac{50}{25} = 2$.

2) По табл. 3.7 [3] для $\Delta\alpha = 0,0436 \text{ дБ}$ получаем $\delta \leq 0,0098$ и $K_{\text{БВ}\phi} > 0,82$.

3) Определяем число реактивных элементов при равнобедренной АЧХ:

$$m^* = \frac{2 \text{Arch} \sqrt{\frac{1 - \delta (r-1)^2}{\delta}}}{\text{Arch} \left(\frac{K_f^2 + 1}{K_f^2 - 1} \right)};$$

$$m^* = \frac{2 \text{Arch} \sqrt{\frac{1 - 0,0098 (2-1)^2}{0,0098}}}{\text{Arch} \left(\frac{4+1}{4-1} \right)} = 3,08.$$

Округляем m^* до $m = 4$.

4) Для равнобедренной АЧХ уточняем δ , $\Delta\alpha$, $K_{\text{БВ}\phi}$;

$$\delta = \frac{r-1}{(r-1)^2 + 4r \cdot \text{ch}^2 \left(\frac{m}{2} \text{Arch} \left(\frac{K_f^2 + 1}{K_f^2 - 1} \right) \right)};$$

$$\delta = \frac{2-1}{(2-1)^2 + 4 \cdot 2 \cdot ch^2 \left(\frac{4}{2} \operatorname{Arch} \left(\frac{2^2+1}{2^2-1} \right) \right)} = 0,006.$$

$$\Delta\alpha = 10 \lg \left(\frac{1}{1-\delta} \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{1-0,006} \right) = 0,026 \text{ дБ.}$$

$$KBB_{\phi} = \frac{1-\sqrt{\delta}}{1+\sqrt{\delta}} = \frac{1-\sqrt{0,006}}{1+\sqrt{0,006}} = 0,856.$$

5) Рассчитываем коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$;
при $m = 4$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{\nu M^2 - 2M}{2r} + \sqrt{\left(\frac{\nu M^2 - 2M}{2r} \right)^2 + \frac{M^2}{r^3}}};$$

$$\alpha_2 = \frac{M}{\alpha_1}, \quad \alpha_3 = \frac{\alpha_2}{r}, \quad \alpha_4 = r\alpha_1,$$

где $M = 2 \sqrt{\frac{1+r}{r}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\delta\alpha}{(1+\delta)M^4 + \delta H}}$,

$$H = \alpha\nu^4 - \frac{b\mu q + c\mu^4}{\nu};$$

$$\nu = 1 + \frac{1}{K_f^2};$$

При равноколебательном АЧХ $b = 4, c = 1, a = 1$.

$$\nu = 1 + \frac{1}{4} = 1,25, \quad \mu = 1 - \frac{1}{2^2} = 0,75,$$

$$H = 4 \cdot 1,25^4 - (4 \cdot 1,25^2 \cdot 0,75^2 + 1 \cdot 0,75^4) = 6,566.$$

$$M = 2 \sqrt{\frac{1+2}{2}} \cdot \sqrt[4]{\frac{0,006 \cdot 4}{(1+0,006) \cdot 0,75^4 + 0,006 \cdot 6,566}} = 1,25;$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{1,25 \cdot 1,25^2 - 2 \cdot 1,25}{2 \cdot 2} + \sqrt{\left(\frac{1,25 \cdot 1,25^2 - 2 \cdot 1,25}{2 \cdot 2} \right)^2 + \frac{1,25^2}{2^3}}} = 0,57;$$

$$\alpha_2 = \frac{1,25}{0,57} = 2,19; \quad \alpha_3 = \frac{2,19}{2} = 1,095; \quad \alpha_4 = 2 \cdot 0,57 = 1,14.$$

Значения LC-элементов в схеме (см. рис. 3.8):

$$L_j = \frac{\alpha_j R_{Hном}}{2\pi f_B}; \quad C_{j+1} = \frac{\alpha_{j+1}}{2\pi f_B R_{Hном}} \quad \text{при } j = 1, 3, \dots, m-1, \quad R_{BXном} < R_{Hном};$$

$$L_1 = \frac{\alpha_1 R_{H_{ном}}}{2\pi f_B}; C_2 = \frac{\alpha_2}{2\pi f_B R_{H_{ном}}}; L_3 = \frac{\alpha_3 R_{H_{ном}}}{2\pi f_B}; C_4 = \frac{\alpha_4}{2\pi f_B R_{H_{ном}}}.$$

$$L_1 = \frac{0,57 \cdot 14}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^6} = 0,025 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 25 \text{ нГн};$$

$$L_1 = \frac{1,095 \cdot 14}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^6} = 0,025 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 50 \text{ нГн};$$

$$C_2 = \frac{2,19}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 14} = 498 \text{ пФ};$$

$$C_2 = \frac{1,14}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10^6 \cdot 14} = 259 \text{ пФ}.$$

3. Упражнения и задачи

1. Изобразите варианты простейших ЦС, выполненных в виде Г-образных звеньев ФНЧ. Объяснить особенности их применения в ГВВ.

2. Изобразите ламповую ЦС, представляющую собой контур с частичным включением. Включите измерительные приборы и укажите элементы настройки этой ЦС. Опишите последовательно процесс настройки ЦС.

3. По каким причинам выходные ЦС передатчика выполняют по более сложным схемам, чем промежуточная ЦС?

4. Изобразите сложную схему выхода передатчика. Опишите процедуру настройки сложной ЦС с помощью измерительных приборов и настроечных элементов ЦС.

5. Изобразите варианты простейших ЦС, выполненных в виде Т- и П-образных цепочек ФНЧ. Запишите соотношение для реактивности. Чему равно характеристическое сопротивление таких ЦС?

6. В чём заключается разница между свойствами фильтров Баттерворта, Чебышева и Кауэра?

7. На чём основан принцип структурного синтеза фильтров?

8. Дайте определение инвертирующим и трансформирующим цепям согласования. Приведите примеры их построения.

9. В чём состоит назначение цепей согласования в многокаскадном передатчике.

10. Почему цепи связи целесообразно строить по структуре фильтров низких частот?

11. При каких условиях в качестве L- и C-элементов цепей связи можно использовать отрезки длинных линий?

12. Изобразите схему трансформатора на отрезках длинных линий с коэффициентом трансформации сопротивлений 1:16 при несимметричных входе и выходе.

13. Перечислите причины, ограничивающие полосу согласования выходных согласующих цепей.

14. Определите параметры и КПД ЦС, выполненной в виде Г-образного звена, если ГВВ обеспечивает заданный режим при $R_{\text{ВЫХ}} = 175 \text{ Ом}$ на частоте $f = 10 \text{ МГц}$, а входное сопротивление следующего каскада $R_{\text{ВХ}} = 50 \text{ Ом}$. Добротность контура $Q = 100$.

15. Выполните предыдущую задачу для тех же условий и в случае применения П-образного звена.

16. Определите параметры Т-образного звена ФНЧ, включённого в коллекторную цепь ГВВ с выходным сопротивлением $R_{\text{ВЫХ}} = 50 \text{ Ом}$, работающим на частоте $1,5 \text{ МГц}$. Входное сопротивление следующего каскада $R_{\text{ВХ}} = 25 \text{ Ом}$.

17. Полное сопротивление нагрузки линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом равно $75 - j \cdot 100 \text{ Ом}$. Длина волны в линии составляет 1 м . Определите возможное полное сопротивление нагрузки на расстоянии 5 м от источника сигнала.

18. Определите длину и волновое сопротивление линии, при которых полное сопротивление нагрузки линии будет чисто вещественным, если на частоте 500 МГц комплексное полное сопротивление нагрузки воздушной линии передачи равно $30 - j \cdot 65 \text{ Ом}$.

19. Вычислите коэффициенты отражения, соответствующие полным сопротивлениям $10^3 - j \cdot 50$ и $15 + j \cdot 30 \text{ Ом}$ и найдите полное сопротивление, которое соответствует коэффициенту отражения $\Gamma = 0,5 \cdot e^{j45^\circ}$ для линии передачи с волновым сопротивлением $Z_c = 50 \text{ Ом}$.

20. Рассчитайте выходную согласующую цепь усилителя, выполненного на транзисторе 2Т903А, если рабочая частота УМ $f = 100 \text{ МГц}$, сопротивление нагрузки $R_n = 50 \text{ Ом}$, эквивалентное сопротивление согласующей цепи на выходных электродах транзистора, обеспечивающее оптимальный режим, $R_{\text{ВЫХ}} = 20 \text{ Ом}$, выходная ёмкость транзистора $C_K = 50 \dots 180 \text{ пФ}$.

21. Определите параметры входной цепи согласования усилителя мощности, если на рабочей частоте $f_p = 200 \text{ МГц}$ параметры входной цепи мощного биполярного транзистора определены: $R_{\text{ВХ}} = 1 \text{ Ом}$, $R_{\text{ПАР}} = 13,2 \text{ Ом}$, $L_{\text{ВХ}} = 3 \text{ нГн}$, $C_{\text{ВХ}} = 720 \text{ пФ}$.

22. Вычислите полные сопротивления нагрузки линии передачи с волновым сопротивлением 75 Ом для коэффициентов отражения -1 ; $0,1$; $0,5 \cdot e^{j90^\circ}$. Используйте диаграмму Смита–Вольперта.

23. Постройте согласующую цепь на трансформаторах–линиях с коэффициентом трансформации сопротивлений $1:16$ при симметричных входе и выходе.

24. Приведите схему выходной колебательной системы мощного лампового генератора и на её примере рассмотрите принципы автоматизированной настройки контуров.

25. Изобразите структурную схему системы автоматической регулировки связи с нагрузкой и сформулируйте основные принципы построения схем автонагрузки.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

Схемотехника ГВВ

1. Общие сведения

После определения активного элемента (транзистор, генераторная лампа, триод, тетрод, пентод) и нагрузочной системы (резонансная, фильтровая, апериодическая) важным этапом в построении принципиальной схемы ГВВ является выбор общего электрода АЭ и точки заземления. Общим называется электрод АЭ, принадлежащий одновременно входной и выходной цепям ГВВ. Трёхэлектродные АЭ можно включать по схемам с общим эмиттером (катодом, истоком), общей базой (сеткой, затвором) и общим коллектором (анодом, стоком). В зависимости от того, какой электрод АЭ выбран общим, существенно различаются основные параметры ГВВ. Эти отличия вызваны разными значениями входной, выходной и проходной проводимостей АЭ в схемах с ОЭ, ОБ и ОК. Особенно велика роль проходной проводимости, от которой зависит связь между входной и выходной цепями ГВВ. За счёт этой проводимости возникают явления обратной реакции и прямого прохождения мощности из входной цепи в нагрузку, вредное влияние которых усиливается с ростом частоты.

Общие рекомендации по выбору общего электрода сводятся к следующему: в ламповых схемах на триодах, где проходная проводимость определяется большой ёмкостью анод – сетка (C_{AC}), можно построить ГВВ по схеме с общим катодом, устойчиво работающим до частот порядка единиц МГц. При мощности до ста – двухсот кВт используют тетроды, у которых ёмкость C_{AK} на 1...2 порядка меньше, чем у триодов, что повышает предельно рабочие частоты ГВВ на этих лампах до сотен МГц. При большой мощности ГВВ и на частотах выше десятков МГц применяют триоды по схеме с общей сеткой. В этом случае роль проходной ёмкости выполняет ёмкость анод – катод (C_{AK}), обычно на порядок меньше чем C_{AC} . Это создаёт благоприятные возможности для устойчивой работы ГВВ. В усилителях мощности на биполярных транзисторах применяют в основном схемы с ОЭ. Схемы с ОБ используются на больших частотах — порядка $f_{ГР}$, где ценой ослабления требований к стабильности удаётся получить приемлемое усиление мощности, которое не могут обеспечить схемы с ОЭ. Схемы с ОК из-за низкого коэффициента усиления по напряжению в узкополосных ГВВ практически не используются.

В ГВВ и других устройствах необходимо соединять с корпусом прибора «землём» одну из точек схемы. Точку заземления надо выбирать так, чтобы паразитная ёмкость на землю участков схемы с большим высокочастотным потенциалом была минимальной. Различают точки непосредственного соединения

корпуса и точки с нулевым высокочастотным потенциалом, а также соединенные с корпусом блокировочными конденсаторами. В ГВВ по схеме с общим эмиттером (катодом, истоком) и общей базой (сеткой, затвором) обычно с корпусом соединяют общий электрод, который оказывается заземленным как по постоянному току, так и по высокой частоте. В тех случаях, когда общий электрод должен иметь какой-то постоянный потенциал, этот электрод заземляется через блокировочный конденсатор по высокой частоте. От этих правил приходится отступать, если в некоторых АЭ (транзисторах) с корпусом соединен один из выводов (коллектор). Для улучшения охлаждения транзистор нужно устанавливать на шасси, т.е. заземлять коллектор по постоянному току. В то же время ГВВ может быть построен по схеме с ОЭ или с ОБ.

2. Проектирование внешних схем ГВВ

Чтобы обеспечить расчётный режим ГВВ, нужно правильно спроектировать внешние схемы ГВВ – питания, смещения, согласования.

Выходная цепь АЭ ГВВ содержит цепь согласования и источник питания. Эти элементы схемы можно включить последовательно либо параллельно. При последовательной схеме источник питания, выходная согласующая цепь и АЭ соединены последовательно. Для исключения потери мощности ВЧ в источнике питания и устранения нежелательных связей между каскадами передатчика через источник питания последний подключается к АЭ через ФНЧ, образованный $L_{БЛ}$ и $C_{БЛ}$. Чтобы исключить возбуждения колебаний в цепи, образованной фильтром и АЭ, в нее включают антипаразитный резистор $R_{АП}$. Эквивалентная цепь питания для НЧ представлена на рис. 4.1.

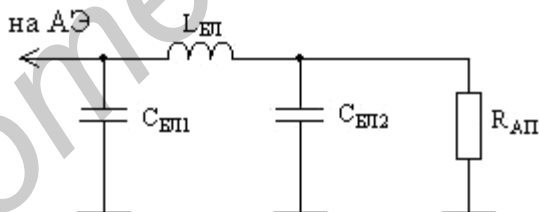


Рис 4.1. Эквивалентная схема питания для НЧ

Для определения блокировочных элементов воспользуемся известным в теории фильтров соотношением:

$$R_k = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Так как $R_k = R_{АП}$, $L = L_{БЛ}$, $C_{БЛ1} = C_{БЛ2} = \frac{C}{2}$, то параметры ФНЧ, представленного на рис. 4.1, будут определяться формулой

$$L_{БЛ} = 2R_{АП}^2 \cdot C_{БЛ}.$$

Емкость блокировочного конденсатора и величина резистора $R_{АП}$ обычно выбирается из условий: $\frac{1}{\omega_{\min} \cdot C_{БЛ}} \leq 0,1 \cdot R_k$, $R_{АП} \leq 0,1 \cdot R_k$, где R_k – входное сопротивление выходной цепи согласования, известное из ее расчета.

На рис. 4.2. изображена последовательная схема питания АЭ.

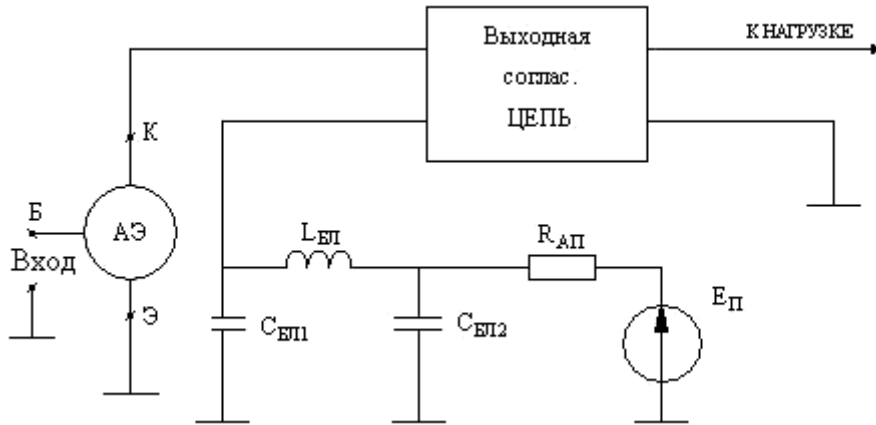


Рис. 4.2. Последовательная схема питания АЭ

Схема параллельной цепи питания, в которой все элементы, образующие ГВВ, соединены параллельно, представлена на рис. 4.3.

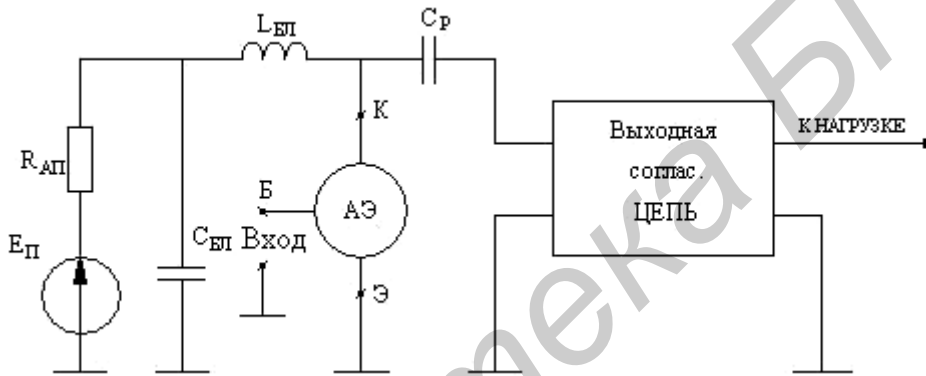


Рис. 4.3. Параллельная схема питания АЭ

Расчетные формулы для параллельной схемы такие же, как для последовательной:

$$1) \omega_{\min} \cdot L_{БЛ} \gg R_{К}; \quad 2) R_{АП} \leq 0,1 \cdot R_{К}; \quad 3) C_{БЛ} = \frac{L_{БЛ}}{2 \cdot R_{АП}^2}; \quad 4) C_{БЛ1} \approx C_{Р}.$$

При одной и той же величине $R_{АП}$ блокировочные емкости и индуктивности в последовательной схеме питания много меньше, чем в параллельной.

Для выбора рабочей точки на управляющий электрод подают постоянное напряжение и применяют параллельную (рис. 4.4, а) или последовательную (рис. 4.4, б) цепь смещения.

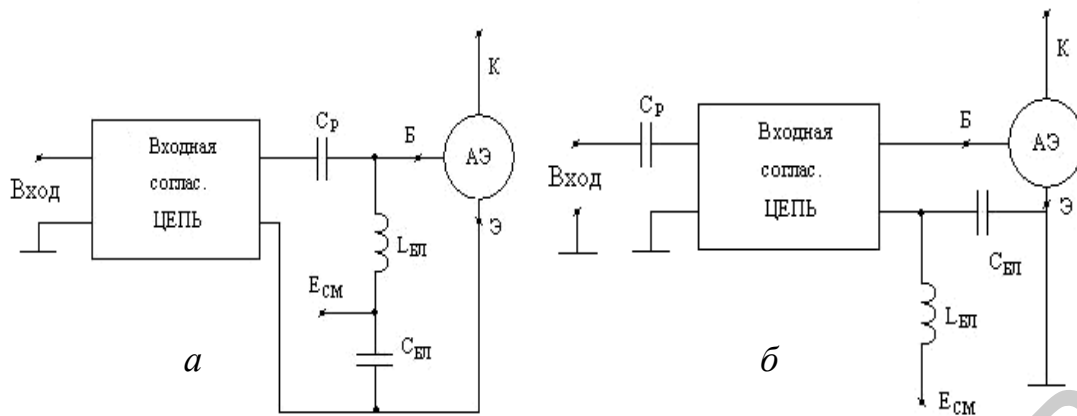


Рис.4.4. Схемы подачи фиксированного напряжения смещения на управляемый электрод

Автосмещение образуется в результате падения постоянного напряжения на сопротивлении автосмещения $R_{см}$ из-за протекания по нему постоянной составляющей входного тока. Различные варианты схем автосмещения представлены на рис. 4.5.

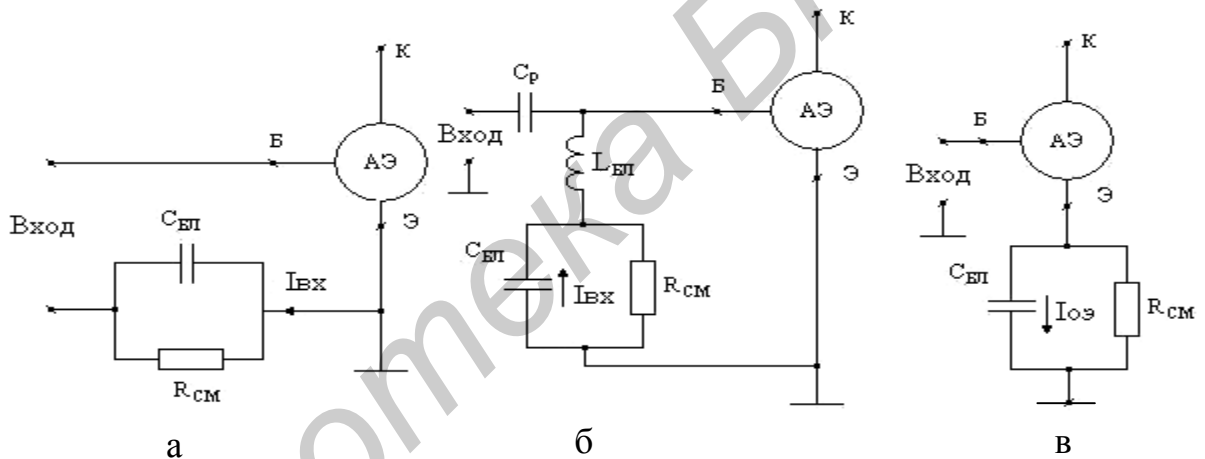


Рис. 4.5. Схемы автосмещения: а – последовательная; б – параллельная; в – последовательная, обусловленная протеканием эмиттерного тока

Пример: Построить принципиальную схему ГВВ на тетроде с общим катодом. Питание анода АЭ последовательное. Смещение осуществляется от отдельного источника (выпрямителя) по последовательной схеме включения. Экранирующая сетка питается от отдельного источника. Для контроля режима включаются измерительные приборы.

На рис. 4.6 приведена схема последовательного питания в цепи сетки и анода ГВВ, собранного на тетроде.

которые не имеют высокочастотного потенциала относительно земли; б) зажимы каждого прибора блокируют конденсатором большой ёмкости (1...10) пФ; в) приборы для измерения токов желательнее включать в цепи, не имеющие высокого потенциала.

3. Упражнения и задачи

1. Изобразите схему параллельного питания в цепях анода и управляющей сетки лампового ГВВ. Каковы её достоинства и недостатки?
2. Изобразите схему последовательного питания в цепях анода и управляющей сетки. Каковы её достоинства и недостатки?
3. Почему при сложении мощностей АЭ ограничиваются параллельным включением не более двух–трёх АЭ?
4. Назовите области применения двухтактного включения АЭ. Почему в ламповой технике отказываются от двухтактного построения, а в транзисторной двухтактные генераторы используются широко?
5. В чём состоят особенности построения цепей питания накала лампового автогенератора при питании переменным током?
6. Нарисуйте схему ГВВ с общей сеткой на тетроре с подачей напряжения смещения от выпрямителя. В чём состоят особенности её построения?
7. Нарисуйте схему ГВВ с общим эмиттером и заземлённым коллектором. В чём состоят особенности её построения?
8. Какие целесообразно применять мостовые схемы при построении РПУ, перекрывающего диапазон 1,5...30 МГц?
9. Почему на практике широко применяют квадратурные мостовые схемы, несмотря на большую сложность их практической реализации?
10. Изобразите схему ГВВ с параллельно–двухтактным включением АЭ. Почему такие схемы получают всё большее распространение на практике?
11. Составьте топологическую схему усилителя СВЧ на полевом транзисторе. В чём состоят особенности построения такой схемы?
12. Изобразите принципиальную схему двухтактного полупроводникового усилителя мощности с применением трансформаторов-линий. В чём состоит их преимущество по сравнению с традиционными схемами?
13. Почему на практике все большее распространение получают двухтактные ГВВ на балансных транзисторах? В каком диапазоне частот они работают?
14. Составьте принципиальную схему тетродного усилителя мощности 3-го телевизионного диапазона. Перечислите преимущества и недостатки схем с ОК и ОС.
15. Изобразите схему выходной цепи ГВВ на биполярном транзисторе типа КТ921А. Нагрузочная система – широкодиапазонный трансформатор. Питание последовательное. Определите ёмкость блокировочного конденсатора, если $R_H = 50 \text{ Ом}$, $f_p = 50 \text{ МГц}$.

16. Постройте выходную цепь ГВВ на полевом транзисторе типа 2П901А с ЦС типа двухзвенного Т-образного фильтра. Питание параллельное. Определите значения блокировочного дросселя L_6 , если $f_p = 15$ МГц, $R_H = 600$ Ом.

17. Изобразите выходную цепь ГВВ на тетроре ГЧ-44Б с резонансной нагрузкой. Определите блокировочные элементы, если диапазон рабочих частот 0,6...1,2 МГц, а $R_H = 1,2$ кОм.

18. Определите значение блокировочных элементов L_6 , C_6 , если триод ГК-10П работает на частоте $f = 0,5$ МГц, а амплитуда первой гармоники выходного тока $I_{ВЫХ1} = 20$ А и выходное напряжение на нагрузочной системе $U_{ВЫХ} = 9,2$ кВ.

19. Выходной каскад радиовещательного РПДУ работает на триоде ГЧ-68А на частоте 500 кГц с комбинированным смещением. Определите сопротивление резистора автосмещения и значение блокировочных элементов $L_{см}$, $C_{см}$, если $I_{c0} = 5$ А, $E_{см} = -350$ В.

20. Рассчитайте сопротивление резисторов делителя в ГВВ, собранном на транзисторе КТ603 с ОЭ, если постоянный базовый ток $I_{б0} = 3,4$ мА, $E_{см} = 0,7$ В, $E_{П} = 12$ В. Определите мощность, рассеиваемую на делителях, а также емкость разделительного конденсатора.

21. Составьте схему каскада РПДУ на тетрод ГЧ-70Б для работы в диапазоне ВЧ. Выбор нагрузочной системы и способов питания цепей выполните самостоятельно. Рассчитайте элементы цепи экранирующей сетки.

22. Обоснуйте наиболее экономичный с энергетической точки зрения способ питания экранирующей сетки.

23. Перечислите способы получения автоматического смещения. Поясните принцип получения автоматического смещения на примере схемы с обобщённым АЭ. Какое действие на режим работы ГВВ оказывает автосмещение?

24. Составьте схему ГВВ с распределённым усилением. В каком диапазоне частот она используется? Перечислите её достоинства и недостатки.

25. Какие режимы работы возможны в СВЧ-диодном генераторе с внешним возбуждением? Как определяется в нем коэффициент усиления по мощности? Составьте один из вариантов усилительного каскада.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

Генераторы с самовозбуждением (автогенераторы)

1. Общие сведения

Автогенератор (АГ) – это источник электромагнитных колебаний, возбуждающихся самопроизвольно, без внешнего воздействия. Поэтому АГ в отли-

ции от ГВВ часто называют генератором с самовозбуждением. Схемотехника АГ основывается на обеспечении условий самовозбуждения – балансов амплитуд и фаз. Как известно [1], эти условия выполняются в трехточечных схемах АГ – емкостной и индуктивной. Главное требование, предъявляемое к АГ, – высокая стабильность частоты. В современных РПДУ АГ в основном выполняются на полупроводниковых АЭ–транзисторах, либо диодах.

В транзисторных АГ зависимость нестабильности частоты определяется выражением

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{1}{Q_H} \left[\omega \cdot \tau_s - \omega \cdot \tau_k \cdot \frac{1 + (1 + K_{oc}) \cdot \delta}{K_{oc}} \right],$$

где Q_H – добротность колебательной системы;

τ_s – постоянная времени статической крутизны S ;

$\varphi_s = \omega \cdot \tau_s$ – фаза крутизны S .

Постоянная времени и статическая крутизна возрастают с увеличением тока коллектора. Постоянная времени коллекторной цепи

$$\tau_k = C_k \cdot r_{\bar{o}},$$

где C_k – емкость коллекторной цепи, которая падает с увеличением напряжения на коллекторе;

$r_{\bar{o}}$ – сопротивление базы;

Безразмерный коэффициент

$$\delta = [1 - \gamma_1(\theta)] / S \cdot r_{\bar{o}} \cdot \gamma_1(\theta).$$

Наряду с непосредственным влиянием на частоту постоянной составляющей коллекторного тока и напряжения на коллекторе существенным является также и их косвенное воздействие на частоту вследствие изменения температуры транзистора из-за выделения мощности, рассеиваемой на коллекторе. Изменение температуры обуславливает нестабильность частоты

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\frac{1}{2Q_H} \cdot \omega \tau_s \cdot \varepsilon_\tau \cdot R_{nc} \cdot I_{ко} \cdot E_{II},$$

где ε_τ – температурный коэффициент постоянной времени τ_s ;

R_{nc} – тепловое сопротивление между переходом и корпусом.

Составляющую нестабильности частоты, связанную с влиянием температуры (саморазогревом), необходимо учитывать только при изменении напряжения питания коллектора. Влияние саморазогрева на частоту можно уменьшить, применив охлаждающий радиатор. Охлаждение приводит к снижению теплового сопротивления.

Для ослабления влияния перечисленных дестабилизирующих факторов АГ помещают в термостаты, осуществляют подбор высокочастотных АЭ и прецизионных элементов колебательного контура, обеспечивают применение печатного монтажа и т.д. Такой способ стабилизации частоты АГ называется параметрическим. Он позволяет снизить нестабильность частоты до значений $5 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^{-5}$. Дальнейшее повышение стабильности возможно при использо-

вании в АГ в качестве элементов колебательного контура резонаторов на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и кварцевых резонаторов (КР). АГ с резонаторами на ПАВ используются на частотах вплоть до 1...2 ГГц. Стабильность частоты их колебаний лишь на один–полтора порядка хуже стабильности кварцевых АГ.

Прямую стабилизацию частоты АГ с помощью КР используют в возбуждателях РПДУ, когда нестабильность частоты за длительный промежуток времени не должна превышать 10^{-4} .

Одна из возможных принципиальных схем гармоникового кварцевого АГ изображена на рис. 5.1.

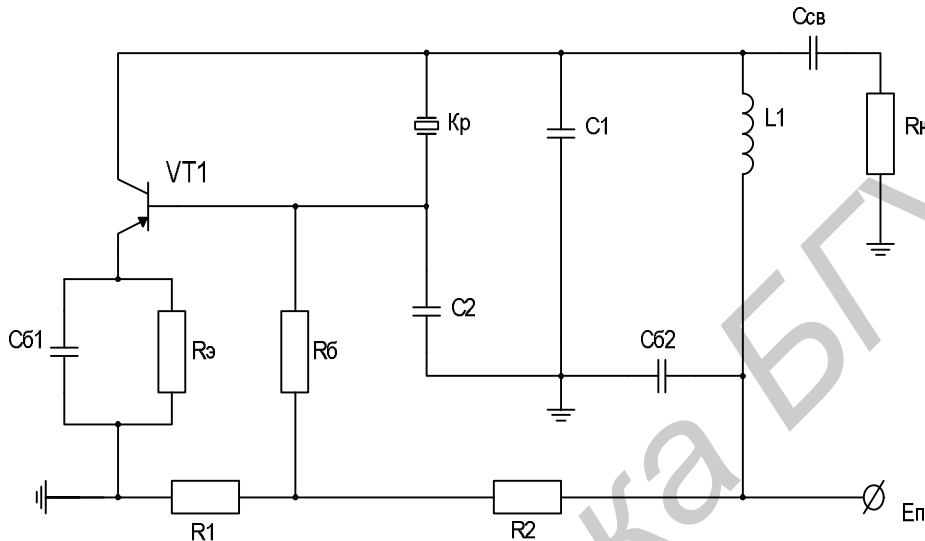


Рис. 5.1. Принципиальная электрическая схема автогенератора

Обычно при расчетах КР заменяют эквивалентной схемой последовательно соединенным активным R_{KB} и реактивным X_{KB} сопротивлениями, т.е.

$$Z_{KB} = R_{KB} + jX_{KB} = r_{KB} (1 + j\nu)(1 - \nu\tau_0 + j\tau_0)^{-1},$$

где $R_{KB} = r_{KB} \left[(1 - \tau_0\nu)^2 + \tau_0^2 \right]^{-1},$

$$X_{KB} = R_{KB} \left[1 - \tau_0 + \nu_0 - \tau_0\nu^2 \right];$$

$$\tau_0 = \omega_0 C_0 r_{KB}, \quad \nu = Q_{KB} \left(\frac{f}{f_k} - \frac{f_k}{f} \right), \quad Q_{KB} = \frac{\omega_{KB} L_{KB}}{r_{KB}},$$

где r_{KB}, L_{KB}, Q_{KB} – соответственно активное сопротивление, индуктивность, добротность КР;

C_0 – емкость кварцедержателя.

Примерно до 20 МГц КР возбуждают на основной частоте, а выше 20 МГц – на механических гармониках. Для уменьшения нестабильности частоты и повышения эксплуатационной надежности АГ рассеиваемая мощность на КР P_{KB} не должна превышать допустимого значения $P_{KB\text{дон}}$, указанного в справочных данных:

$$P_{KB} \leq P_{KB\text{доп}}.$$

В АГ с кварцем используют маломощные АЭ различных типов, поскольку колебательная мощность АГ P_1 , выделяемая в коллекторной цепи, того же порядка, что $P_{\text{ВЫХ}}$, и составляет 1...10 мВт. Выбор типа АЭ зависит от требований к конструктивному оформлению АГ. Для устройств на элементах с сосредоточенными параметрами и гибридных чаще всего используют транзисторы и транзисторные матрицы. Поскольку параметры биполярного транзистора зависят от соотношения между рабочей частотой f_k и граничной частотой коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером рекомендуется выбирать АЭ так, чтобы выполнялось условие

$$f_{zp} \geq (3-5)f_k.$$

Параметры полевых транзисторов в широкой области частоты почти не меняются и только с некоторой критической частоты f_{kp} резко проявляются их инерционные свойства. Для выбора полевого транзистора можно принять

$$f_k \leq 0,8f_{kp}.$$

КР выбирают на заданную частоту, его тип определяется требованиями к нестабильности частоты АГ, предпочтение следует отдавать КР с малыми значениями произведения $C_0 r_{KB}$, при этом легче выполняются условия самовозбуждения в АГ, особенно на гармониках.

В основе общего метода расчета лежит уравнение стационарного режима АГ:

$$\dot{S}_{cp} \cdot K_{oc} \cdot \dot{Z}_n = 1.$$

Крутизна биполярного транзистора \dot{S}_{cp} определяется выражением

$$\dot{S}_{cp} = S_{cp} (1 + j\Omega_s)^{-1},$$

где $S_{cp} = S \cdot \gamma_1(\theta)$;

S – крутизна аппроксимированной статической проходной характеристики;

$\gamma_1(\theta)$ – коэффициент разложения первой гармоники косинусоидального импульса;

θ – высокочастотный угол отсечки;

$\Omega_s = \frac{f_k}{f_s}$ – нормированная частота по f_s .

$$f_s = \frac{f_{zp}}{S r'_0};$$

$K_{oc} = -\frac{Z_2}{Z_2 + Z_3}$ – коэффициент обратной связи.

$$\dot{Z}_H = \frac{\dot{Z}_1 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_3)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3} - \text{сопротивление нагрузки.}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z}_1 &= R_1 + jX_1; \\ \dot{Z}_2 &= R_2 + jX_2; \\ \dot{Z}_3 &= R_3 + jX_3 \end{aligned} \right\} - \text{комплексные сопротивления колебательной системы.}$$

В схеме АГ (см. рис. 5.1) КР включен последовательно с элементами контура и потери на КР много больше, чем в остальных элементах схемы, т.е. $P_{\text{кон}} = 0$ и можно считать, что

$$\dot{P}_1 = P_H + P_{KB}.$$

Тогда можно считать, что $R_1 = R_2 = 0$, а вся мощность P_1 выделяется на сопротивлении $R_3 = R_{KB} (1+a)$, где $a = \frac{P_H}{R_{KB}}$. С учетом принятых допущений

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 &= jX_1, \quad \dot{Z}_2 = jX_2, \quad \dot{Z}_3 = jX_3 = R_{KB} (1+a) + jX_{KB}; \\ X_1 &= -\frac{1}{\omega_K C_{1\text{экв}}}, \quad X_2 = -\frac{1}{\omega_K C_2}, \quad C_{1\text{экв}} = C_1 - \frac{1}{\omega_K^2 L_1} = C_1 \left[1 - (\omega_K^2 C_1 L_1) \right]^{-1} \end{aligned}$$

уравнение стационарного режима АГ примет вид

$$S(1 + j\Omega_s)^{-1} \frac{X_1 X_2}{R_{KB} (1+a) + j(X_1 + X_2 + X_{KB})} = 1.$$

После разделения этого уравнения на действительную и мнимую части получим исходные равенства для определения параметров и режима кварцевого АГ:

$$\begin{aligned} R_{KB} (1+a) &= S \cdot X_1 \cdot X_2 (1 + \Omega_s^2)^{-1}, \\ X_{KB} &= -(X_1 + X_2) - \Omega_s R_{KB} (1+a). \end{aligned}$$

2. Пример расчета гармонического автогенератора с кварцем между коллектором и базой

Исходные данные:

мощность в нагрузке $P_H = 0,15$ мВт;

рабочая частота $f_{\Gamma} = 40$ МГц;

относительная нестабильность частоты $\frac{\Delta f}{f} = 0,5 \cdot 10^{-5}$.

Решение.

1. Выбираем биполярный транзистор ГТ311 со следующими параметрами:

$$F_{2p} = 500 \text{ МГц}; h_{21} = 50;$$

$$r_{\dot{\theta}} = 60 \text{ Ом}; C_{ка} = C_{нф} = 1 \text{ пФ};$$

$$i_{к \max} = 50 \text{ мА}; U_{КЭ \max} = 12 \text{ В};$$

$$U_{отс} = 0,3 \text{ В}; S_{кр} = 0,05 \text{ А/В};$$

$$P_{\max} = 0,15 \text{ Вт при } t_{cp} = +25^{\circ}\text{C}.$$

2. Выбираем кварцевый генератор со следующими параметрами:

$$F_p = 20 \text{ МГц}; r_{KB} = 50 \text{ Ом};$$

$$Q_{KB} = 10; P_{KB \text{дон}} = 2 \text{ мВт}.$$

3. Выбираем простейшую схему гармонического кварцевого автогенератора (рис. 5.1).

Расчет схемы проводим на $f_2 = 40 \text{ МГц}$, что соответствует возбуждению КР на второй механической гармонике.

4. Определим параметр качества кварца:

$$\tau_0 = \omega_2 \cdot C_0 \cdot r_{KB} \leq 0,5;$$

$$\tau_0 = 2\pi \cdot 40 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \approx 0,06 < 0,5.$$

5. Выбираем амплитуду тока $i_{к \max}$ и коэффициент a , напряжение на коллекторе U_{Ko} , угол отсечки θ .

$$i_{к \max} \leq (0,5 \dots 0,8) i_{к \text{дон}};$$

$$i_{к \max} = 10 \text{ мА};$$

$$a = \frac{P_H}{(P_{KB} + P_2)} \leq 0,25;$$

$$a = 0,1;$$

$$U_{Ko} \leq (0,4 \dots 0,5) U_{KB \text{дон}};$$

$$U_{Ko} = 5 \text{ В};$$

$$\gamma(\theta) = 0,1 \dots 0,3;$$

$$\gamma(\theta) = 0,2;$$

$$\theta = 60^{\circ},$$

где $P_{KB \text{дон}}$ – мощность, выделяемая на КР; а P_2 – мощность, рассеиваемая на активном сопротивлении колебательной системы.

6. Определяем мощность, рассеиваемую на КР, и колебательную мощность, выделяемую в коллекторной цепи из уравнения баланса мощностей:

$$P_1 = P_H + P_{KB} + P_2.$$

Принимаем $P_2 = 0$ ввиду её малости.

$$P_{KB} = \frac{P_H}{a}; \quad P_{KB} = \frac{0,15}{0,1} = 1,5 \text{ мВт};$$

$$P_1 = P_H + P_{KB} = 0,15 + 1,5 = 1,65 \text{ мВт};$$

$$P_{KB} = 1,5 \text{ мВт} < P_{KB\text{дон}} = 2 \text{ мВт}.$$

7. Находим аппроксимированные параметры транзистора. В маломощных транзисторах при недоиспользовании их по току необходимо считаться с нелинейностью статических характеристик и учитывать зависимость идеализированных параметров эквивалентной схемы от высоты импульса.

$$S_n = 15 \cdot i_{K\text{max}}; \quad r = h_{21o\vartheta} / S_n; \quad S = h_{21o\vartheta} (r'_b + r)^{-1}; \quad f_s = \frac{f_{2p}}{S \cdot r'_b};$$

$$S_n = 0,15 \text{ А/В}; \quad r = 333 \text{ Ом}; \quad S = 0,127 \text{ А/В}; \quad f_s = 65 \text{ МГц}.$$

8. Вычисляем нормированную частоту колебаний.

$$\Omega_s = \frac{f_c}{f_s}; \quad \Omega_s = 40/65 \approx 0,61.$$

9. Определяем значение коэффициента обратной связи.

$$\dot{K}_{oc} = \frac{\dot{U}_{c2}}{U_{c1\text{экв}}} = \frac{x_2}{x_1} = \frac{C_{1\text{экв}}}{C_2}; \quad C_{1\text{экв}} = C_1 - \frac{1}{\omega_c^2 \cdot L_1} = C_1 [1 - (\omega_c^2 \cdot C_1 \cdot L_1)^{-1}].$$

Для этого воспользуемся уравнением баланса амплитуд:

$$R_{\text{экв}}(1+a) = S_{cp} \cdot x_1 \cdot x_2 (1 + \Omega_s^2)^{-1};$$

$$R_{\text{экв}} = \frac{2P_{KB}}{I_{KB}^2}; \quad I_{KB} = \frac{U_{c2}}{x_2}; \quad U_{c2} = \frac{i_{K\text{max}}}{S(1 - \cos\theta)} \quad S_{cp} = S \cdot \gamma_1(\theta);$$

$$K_{oc} = \frac{C_{1\text{экв}}}{C_2} = \frac{i_{k\text{max}}^2 \cdot \gamma_1(\theta)}{2P_{KB} \cdot S \cdot (1 - \cos\theta)^2 (1+a)(1 + \Omega_s^2)};$$

$$K_{oc} = \frac{0,01^2 \cdot 0,2}{2 \cdot 0,015 \cdot 0,5^2 \cdot 1,1 \cdot 1,36} \approx 0,17.$$

10. Рассчитаем параметры колебательной системы.

$$C_{1\text{экв}} = \omega_c^{-1} \{ [K_{oc} \cdot S_1 \cdot (1 + 2 \cdot \tau_0 \cdot \Omega_s) \cdot r_{KB}^{-1} \cdot (1+a)^{-1} \cdot (1 + \Omega_s^2)^{-1}]^{0,5} - \omega_c C_0 \};$$

$$C_{1\text{экв}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^7} \cdot \{ [0,17 \cdot 0,0254 \cdot (1 + 0,12 \cdot 0,61) \cdot \frac{1}{50} + \frac{1}{1,1} \cdot \frac{1}{1,36}]^{0,5} - 5 \cdot 10^{-12} \} =$$

$$= 35 \text{ пФ}.$$

Индуктивность L_1 и емкость C_1 определим из выражения

$$1 < \omega_c^2 L_1 C_1 < \frac{n^2}{(n-1)^2}.$$

Примем $\omega_c^2 L_1 C_1 = 2$. Тогда

$$C_1 = \frac{C_{1\text{экв}}}{1 - (\omega_c^2 L_1 C_1)^{-1}}; \quad C_1 = \frac{35}{0,5} = 70 \text{ пФ};$$

$$L_1 = \frac{C_1 \omega_2^2 L_1 - 1}{\omega_2^2 C_{1экв}}; L_1 = \frac{1}{40 \cdot 40 \cdot 35} = 10,7 \text{ мкГ.}$$

11. Найдём поправку к частоте колебаний:

$$\nu = [x_1(1 + K_{oc}) + \Omega_s r_{кв}] \cdot [2\tau_0 x_1(1 + K_{oc}) + (\tau_0 \Omega_s - 1)r_k]^{-1};$$

$$\nu = \frac{1 + 0,17}{2\pi \cdot 40 \cdot 10^6 \cdot 35 \cdot 10^{12}} + 0,61 \cdot 50$$

$$2 \cdot 0,06 \cdot \left(-\frac{1 + 0,17}{2 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^6 \cdot 35 \cdot 10^{-12}}\right) + (0,06 \cdot 0,61 - 1) \cdot 50 = 1,6.$$

Относительная нестабильность частоты

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\nu}{2Q_{экв}} = 0,8 \cdot 10^{-5} > 0,5 \cdot 10^{-5}.$$

12. Определим гармонические составляющие тока коллектора и амплитуду напряжения на базе и другие параметры АГ:

$$I_{к0} = \alpha_0(\theta) i_{к \max}, I_{к1} = \alpha_1(\theta) i_{к \max}, U_B = \frac{I_{к1}}{S \cdot \gamma_1(\theta)};$$

$$I_{к0} = 10 \cdot 2,22 = 2,2 \text{ мА}, I_{к1} = 10 \cdot 0,39 = 3,9 \text{ мА}, U_B = \frac{3,9}{0,27 \cdot 0,2} = 0,16 \text{ В.}$$

Амплитуда напряжения на коллекторе

$$U_{кэ} = \frac{2 \cdot P_1}{I_{к1} \cdot \cos \varphi_k};$$

$$\cos \varphi_k = [1 + (S_{cp} x_2 + \Omega_s)^2]^{-0,5};$$

$$\cos \varphi_k = [1 + (0,127 \cdot 0,8 \frac{-1}{1 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 10^6 \cdot 200 \cdot 10^{-12}} + 0,61)^2]^{-0,5} = 0,991;$$

$$U_{кэ} = \frac{2 \cdot 1,65 \cdot 10^{-3}}{3,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,991} = 0,85 \text{ В.}$$

Мощность, подводимая к коллекторной цепи:

$$P_0 = I_k E_n; P_0 = 2,2 \cdot 5 = 11 \text{ мВт.}$$

Рассеиваемая мощность на коллекторе

$$P_{PAC} = P_0 - P_1; P_{PAC} = 11 - 1,65 = 9,35 \text{ мВт};$$

$$9,35 \text{ мВт} < P_{PAC \text{дон}} = 0,15 \text{ Вт.}$$

Постоянная составляющая тока базы

$$I_{б0} = \frac{I_{к0}}{h_{21э}}; I_{б0} = \frac{2,2}{50} = 0,044 \text{ мА.}$$

Напряжение смещения на базе:

$$U_{cm} = U_{omc} + U_B [\gamma_0(\theta)(1 + \Omega_s^2)^{-0,5} - \gamma_0(\pi - \theta)];$$

$$U_{cm} = 0,3 + 0,16 \cdot [0,11 \cdot (1 + 0,36)^{-0,5} - 0,61] = 0,22 \text{ В.}$$

Определяем величину сопротивления резистора автосмещения R_9 . С ростом этого сопротивления увеличивается его стабилизирующее действие и ухудшаются энергетические показатели. В качестве компромиссного решения рекомендуется выбирать $R_9 = 100 \dots 500$ Ом. Принимаем $R_9 = 300$ Ом. Сопротивление R_6 найдём из соотношения $R_6 = (10 \dots 20) \times 2 = 200 \dots 400$ Ом. Возьмём $R_6 = 300$ Ом. Величину C_{61} определим из условия:

$$C_{61} = \frac{10}{\omega_k \cdot R_9};$$

$$C_{61} = \frac{10}{1\pi \cdot 4 \cdot 10^7 \cdot 300} = \frac{10^{-8}}{6,28 \cdot 12} = 133 \text{ пФ.}$$

Рассчитаем напряжение источника питания E_n и падение напряжения на резисторе R_1 :

$$E_n = U_{k0} + (I_{k0} + I_{60}) \cdot R_9;$$

$$E_n = 5 + (2,2 + 0,044) \cdot 10^{-3} \cdot 300 \approx 5,7 \text{ В};$$

$$U_{k1} = U_{cm} + (I_{k0} + I_6) \cdot R_9 + I_6 R_6;$$

$$U_{k1} = 0,22 + (2,2 + 0,044) \cdot 300 = 1,0 \text{ В.}$$

Принимаем ток через делитель:

$$I_D = 5 \cdot I_B, \quad I_D = 5 \cdot 0,044 = 0,22 \text{ мА.}$$

Сопротивление делителя в цепи питания:

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_D - I_B}; \quad R_1 = \frac{1,0}{0,17 \cdot 10^{-3}} = 6 \text{ кОм};$$

$$R_2 = \frac{E_n - U_{R1}}{I_D}; \quad R_2 = \frac{5,8 - 1}{0,22 \cdot 10^{-3}} = 21,9 \text{ кОм.}$$

3. Упражнения и задачи

1. Запишите и поясните уравнения баланса амплитуд и фаз, условия самовозбуждения и устойчивости амплитуды и частоты автоколебаний.

2. Постройте характеристики средней крутизны в мягком и жестком режимах самовозбуждения.

3. Определите наименьшую частоту колебаний автогенератора с трансформаторной связью, перестраиваемой емкостью, если коэффициент обратной связи равен 0,3, индуктивность контура 0,1 мкГ, добротность 50, крутизна про-

ходной характеристики - $0,1 \text{ A/V}$. Влиянием выходного напряжения на ток коллектора можно пренебречь.

4. Поясните особенности использования автоматического и комбинированного смещения (смещение от источника питания анода или коллектора в комбинации с автосмещением) в транзисторных и ламповых автогенераторах.

5. Резонансное сопротивление контура 5 кОм , коэффициент обратной связи $0,3$, коэффициент реакции выходной цепи $0,05$, коэффициент включения контура $0,2$. Определите крутизну АЭ для самовозбуждения автогенератора.

6. В автогенераторе с емкостной обратной связью использован контур добротностью 100 и резонансной частотой 3 МГц . Полагая фазу крутизны равной нулю, а фазу коэффициента обратной связи равной $0,01$, определите сдвиг частоты автогенератора относительно резонансной частоты.

7. Изобразите схему одноконтурного автогенератора с емкостной обратной связью (емкостная трехточка) и выведите уравнение резонансного сопротивления относительно точек включения транзистора и коэффициента обратной связи. Запишите условие самовозбуждения.

8. Изобразите схему одноконтурного автогенератора на лампе с индуктивной обратной связью (индуктивная трехточка) и выведите уравнения для резонансного сопротивления и коэффициента обратной связи. Запишите условие самовозбуждения автогенератора.

9. Постройте нагрузочные характеристики автогенератора, используя характеристики средней крутизны для мягкого и жесткого режимов самовозбуждения. Определите минимальные значения сопротивления нагрузки, обеспечивающие самовозбуждение колебаний.

10. Самовозбудится ли автогенератор по схеме емкостной трехточки, если индуктивность контура - 1 мкГ ; емкость, включенная между базой и эмиттером транзистора, - 20000 пФ ; емкость между коллектором и эмиттером 5000 пФ ; добротность контура - 50 ; крутизна транзистора в рабочей точке 10 мА/В ?

11. Изобразите схему транзисторного автогенератора по схеме индуктивной трехточки с источником питания. Резонансная частота контура 1 МГц , емкость между базой и коллектором 1600 пФ , индуктивность между базой и эмиттером $0,5 \text{ мкГ}$. Проверьте, выполняется ли условие самовозбуждения, если крутизна в рабочей точке транзистора $0,2 \text{ А/В}$. Влияние выходного напряжения на ток транзистора не учитывается.

12. С помощью уравнения баланса амплитуд и фаз покажите зависимость частоты автоколебаний от фазового сдвига крутизны коллекторного тока.

13. Почему ухудшаются энергетические показатели и затрудняется выполнение условия самовозбуждения автогенератора, если частота колебаний автогенератора отличается от резонансной частоты колебательной системы?

14. Во сколько раз изменится относительная нестабильность частоты автогенератора при увеличении добротности колебательной системы на порядок, а фазового угла средней крутизны - в два раза?

15. Сравните недонапряженный и перенапряженный режимы работы автогенератора с точки зрения нестабильности частоты.

16. Какими преимуществами обладает емкостная трехточка по сравнению с индуктивной с точки зрения неустойчивости частоты? В каких случаях следует применять неполное включение контура в цепь коллектор – база?

17. Объясните, почему с увеличением затухания контура возрастает влияние коллекторного напряжения на неустойчивость частоты?

18. Почему в стабильных по частоте автогенераторах запас по самовозбуждению нельзя брать слишком большим?

19. Проанализируйте выражение, определяющее неустойчивость частоты АГ на транзисторе (см. “Общие сведения”) и предложите меры по ее уменьшению.

20. В формуле, определяющей значение частоты АГ $f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, отсутствует символ напряжения. Покажите, что изменение питающих напряжений приводит к изменению частоты.

21. Почему каскад, следующий за АГ, как правило, работает в буферном режиме или в режиме умножения радиочастоты?

22. Что такое «параметрическая стабилизация частоты» и какой относительной стабильности можно добиться, используя её?

23. Нарисуйте схему и объясните принцип действия диодного автогенератора. Что такое синхронизация генератора?

24. Приведите схемы RC-генераторов с трёхзвенной RC-цепью и с мостом Вина и дайте их сравнительный анализ.

25. Нарисуйте спектр колебаний автогенератора и объясните образование «пьедестала» спектральной линии.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

Частотные модуляторы

1. Общие сведения

Частотная модуляция осуществляется в задающем АГ РПДУ путем воздействия модулирующих колебаний на несущую частоту либо маломощном ГВВ путем получения фазовой модуляции и преобразования её в частотную.

Частота колебаний в АГ определяется резонансом колебательной системы. Если некоторым образом воздействовать на резонансную систему, то синхронно с этим воздействием будет изменяться частота. Наиболее просто можно получить ЧМ-колебания, если в резонансную систему включить варикап.

Эквивалентная схема закрытого p - n -перехода диода показана на рис. 6.1.

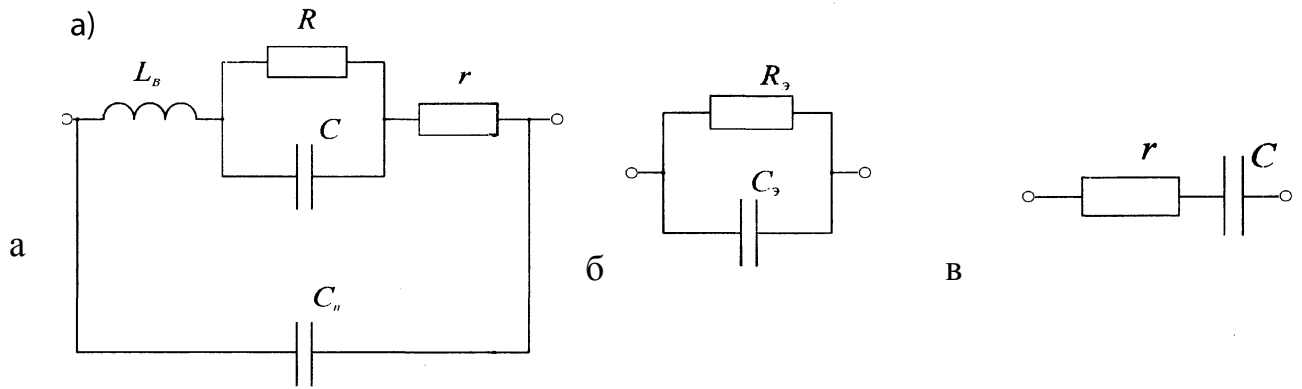


Рис. 6.1. Полная эквивалентная схема варикапа (а), параллельная (б) и последовательная (в) схемы замещения варикапа при закрытом p - n -переходе

На рис. 6.1 введены обозначения:

C – емкость перехода;

R – сопротивление перехода;

r – сопротивление потерь;

L_b – индуктивность выводов;

C_n – емкость патрона полупроводникового прибора (Обычно $C_n \ll C$).

1. Величина емкости C равна

$$C = C_n \left(1 + \frac{E}{\varphi_k}\right),$$

где E – напряжение на варикапе;

C_n – емкость при $E = 0$;

φ_k – контактная разность потенциалов ($\varphi_k = 0,3 \dots 0,4$ В для германиевых диодов; $\varphi_k = 0,8$ В для кремниевых);

γ – коэффициент, зависящий от закона концентрации примесей в p - n -переходе, $\gamma = -\frac{1}{2}$ при ступенчатом изменении концентрации (резкий переход);

$\gamma = -\frac{1}{3}$ при линейном изменении концентрации (плавный переход); $\gamma = -1$ (сверхрезкий переход).

2. Коэффициент перекрытия емкости C :

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \left(\frac{\varphi_k + E_{\min}}{\varphi_k + E_{\max}}\right)^\gamma,$$

где E_{\max} – определяется пробивным напряжением p - n -перехода;

E_{\min} – минимальное напряжение смещения.

Сумма амплитуд модулирующего U_Ω и высокочастотного U_ω напряжений не должна превышать напряжения смещения на p - n -переходе ($U_\Omega + U_\omega < |E_0|$).

3. Параллельная и последовательная схемы замещения закрытого p - n -перехода диода показаны на рис. 1, б, в. На высоких частотах справедливы следующие соотношения:

$$C\varepsilon \approx \frac{C}{1 + \omega^2 C^2 r^2} \approx C,$$

$$R\varepsilon \approx \frac{1}{\omega^2 C^2 r},$$

$$Q\varepsilon \approx \frac{1}{\omega Cr},$$

где $Q\varepsilon$ – добротность емкости закрытого p - n -перехода.

4. Девиация частоты и индекс частотной модуляции (ЧМ):

$$\Delta f_{\partial} = S_{\text{чм}} U_{\Omega}; \quad m = \frac{\Delta f_{\partial}}{F_{\text{max}}} = \frac{S_{\text{чм}} U_{\Omega}}{F_{\text{max}}},$$

где $S_{\text{чм}}$ – коэффициент пропорциональности.

U_{Ω} , F_{max} – соответственно амплитуда и максимальная частота модулирующего колебания.

5. Девиация частоты и индекс фазовой модуляции (ФМ):

$$\Delta f_{\partial} = F_{\text{min}} \Delta \varphi = F_{\text{min}} S_{\text{фм}} U_{\Omega},$$

$$m_{\text{фм}} = \Delta \varphi = S_{\text{фм}} U_{\Omega},$$

где $S_{\text{фм}}$ – коэффициент пропорциональности.

6. Коэффициент паразитной амплитудной модуляции (ПАМ) при работе автогенератора в недонапряженном режиме:

$$\frac{\Delta U}{U} = 4 \frac{\Delta f}{f_0} \frac{Q_K}{Q\varepsilon},$$

где f_0 – средняя частота автоколебаний;

Q_K – добротность контура.

7. Эффективная ширина спектра ЧМ-колебания при учете боковых составляющих, амплитуды которых составляют не менее 5 % от амплитуды немодулированной несущей равна:

а) при $m_{\text{чм}} \ll 1$

$$P_3 = 2F_{\text{max}} (m_{\text{чм}} + 1) \approx 2F_{\text{max}};$$

б) при $m_{\text{чм}} \gg 1$

$$P_3 = 2F_{\text{max}} (m_{\text{чм}} + 1) \approx 2\Delta f_{\partial}.$$

8. Полосы пропускания $2\Delta f_{0,7}$ резонансного усилителя ЧМ-колебаний, при которой коэффициенты нелинейных (K_{H2}) и частотных (K_f) искажений не превышает заданных, соответственно равны

$$2\Delta f_{0,7} \geq F_{\text{max}} \sqrt{\frac{2m_{\text{чм}}^2}{K_H}}; \quad 2\Delta f_{0,7} \geq \frac{2\Delta f_{\text{фм}}}{\sqrt{K_f^2 - 1}};$$

9. Схемы частотных модуляторов при автотрансформаторной (а) и емкостной (б) связи варикапа с колебательным контуром автогенератора приведены на рис. 6.2.

Аналитические соотношения для расчета параметров частотных модуляторов приведены в табл. 6.1.

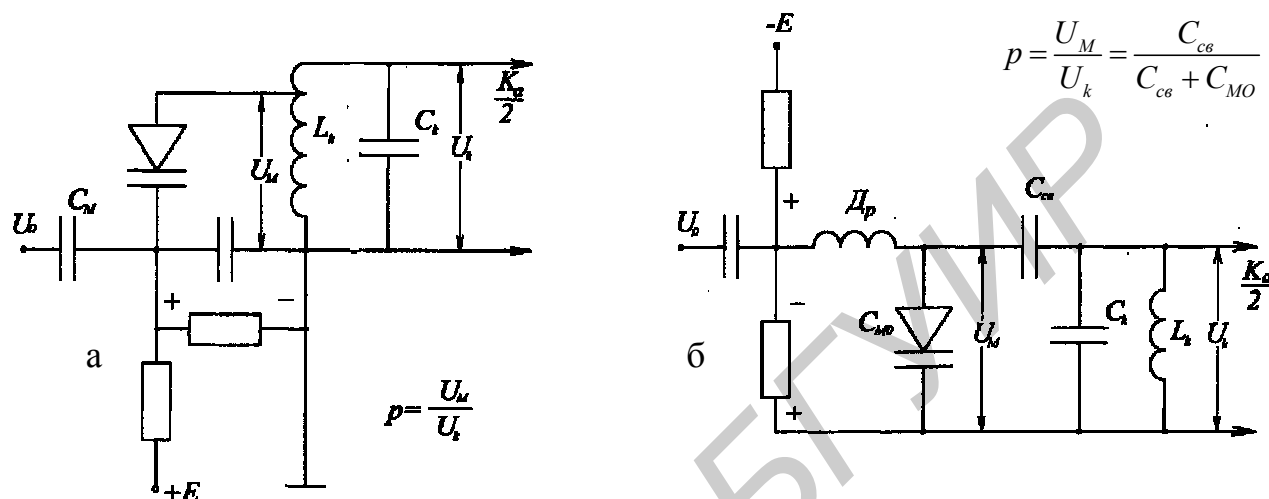


Рис. 6.2. Схемы частотных модуляторов

Таблица 6.1

№	Параметр	Схема (а)	Схема (б)
1	Крутизна модуляционной характеристики $S_f = \frac{\Delta f_0}{U_\Omega}$	$S_f = \frac{-\gamma \cdot f_0}{2E_{M0} \left(1 + \frac{C_k}{p^2 C_{M0}}\right)}$	$S_f = \frac{-\gamma \cdot f_0}{2E_{M0} \left(\frac{1}{p} + \frac{C_k}{p^2 C_{M0}}\right)}$
2	Сдвиг центральной частоты автогенератора под воздействием модулирующего напряжения	$\frac{\Delta f_{0\Omega}}{f_0} = \frac{3}{2} \left(\frac{\Delta f_0}{f_0}\right)^2 \times \left(\frac{1}{2} + \frac{C_k}{p^2 C_{M0}}\right)$	$\frac{\Delta f_{0\Omega}}{f_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta f_0}{f_0}\right)^2 \times \left(\frac{1}{p} + \frac{C_k}{p^2 C_{M0}}\right)$
3	Коэффициент нелинейных искажений при $\gamma = -\frac{1}{2}$	$K_{H_2} = \frac{\Delta f_{0\Omega}}{\Delta f_0}$	$K_{H_2} = \frac{\Delta f_{0\Omega}}{\Delta f_0}$

<p>4 Нестабильность напряжения смещения при допустимом уходе частоты $((\Delta f_0 M_0)_{\max})$ при $\gamma = -\frac{1}{2}$</p>	$\frac{\Delta E_{M0}}{E_{M0}} = 4 \left(\frac{\Delta f_0}{f_0} \right)_{\max} \times \left(1 + \frac{C_k}{p^2 C_{M0}} \right)$	$\frac{\Delta E_{M0}}{E_{M0}} = 4 \left(\frac{\Delta f_0}{f_0} \right)_{\max} \times \left(\frac{1}{p} + \frac{C_k}{p^2 C_{M0}} \right)$
--	--	--

2. Пример расчета частотного модулятора

Исходные данные. Рассчитать частотный модулятор на биполярном транзисторе со следующими данными: несущая частота $f_H = 10$ МГц,

относительная девиация частоты $\frac{\Delta f_d}{f_H} = 0,5 \cdot 10^{-3}$, коэффициент гармоник

$K_G \leq 5\%$, диапазон модулирующих частот $F_{\min} = 300 \dots F_{\max} = 3400$ Гц.

Решение

Расчет модулятора проводим в следующей последовательности:

- 1) Расчет автогенератора.
- 2) Выбор варикапа и расчет его режима.
- 3) Расчет емкости связи варикапа с колебательной системой АГ и делителя напряжения для подачи напряжения смещения на варикап.

1. Выбираем транзистор малой мощности КТ 331 со следующими параметрами: $C_k = 5$ пФ; $C_э = 8$ пФ; $\tau_{oc} = 120$ пс; $U_{omc} = 0,6$ В; $U_{кдоп} = 15$ В; $i_{кдоп} = 20$ мА; $U_{бдоп} = 3$ В; $P_{доп} = 15$ мВт; $S_p = 20$ мА/В; $f_{zp} = 250$ МГц. Считаем, что средний коэффициент усиления тока $B = 20$.

2. Рассчитаем граничные частоты f_β, f_α :

$$f_\beta = \frac{f_{zp}}{B}; \quad f_\beta = \frac{250}{20} = 12,5 \text{ МГц} \ll 2f_H = 20 \text{ МГц}, \quad f_\alpha = f_{zp} + f_\beta;$$

$$f_\alpha = 262,5 \text{ МГц}.$$

Таким образом, необходимо применение корректирующей цепочки.

3. Выбираем принципиальную схему частотно-модулированного АГ, изобра-

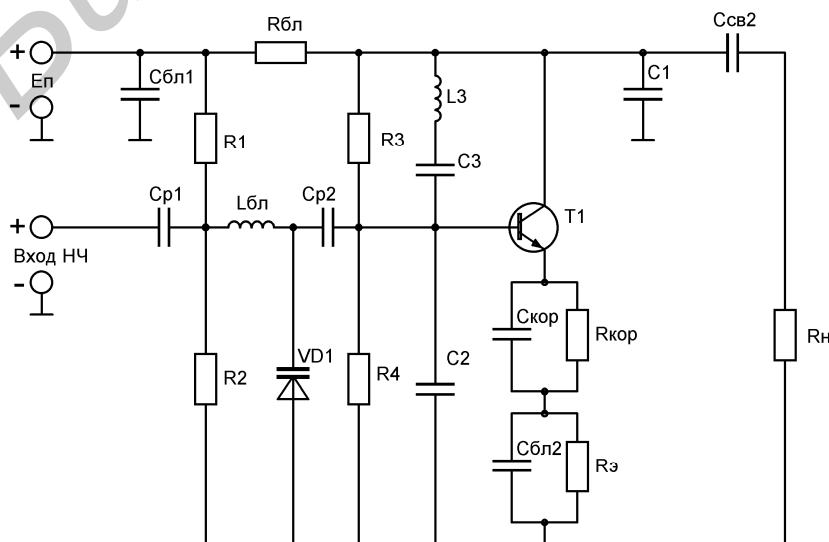


Рис. 2

женную на рис. 6.3.

Рис. 6.3. Принципиальная электрическая схема частотно-модулированного генератора

4. Найдем величину сопротивления базы:

$$r_{\bar{o}} = \frac{\tau_{oc}}{C_{ка}}$$

активная часть коллекторной емкости

$$C_{ка} = (0,2 - 0,3)C_K; \quad C_{ка} = 1,25 \text{ пФ}; \quad r_{\bar{o}} = \frac{120}{1,25} = 96 \text{ Ом.}$$

5. Определим следующие элементы корректирующей цепочки:

$$R_{КОР} = (3...5) \frac{r_{\bar{o}}}{B} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{f_H}{f_{\beta}}\right)^2};$$

$$R_{КОР} = 5 \cdot \frac{96}{20} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{10}{12,5}\right)^2} \approx 34 \text{ Ом};$$

$$C_{КОР} = \frac{1}{2\pi f \alpha \cdot R_{КОР}}; \quad C_{КОР} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 262,5 \cdot 10^6 \cdot 34} \approx 1,8 \text{ пФ};$$

$$R_{\bar{э}} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{зр} \cdot C_{\bar{э}}}; \quad R_{\bar{э}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot 8 \cdot 10^{-12}} \approx 160 \text{ Ом};$$

$$R_{\bar{э}} = 160 > R_{КОР} = 34$$

$$R'_{КОР} = \frac{R_{КОР} \cdot R_{\bar{э}}}{R_{КОР} + R_{\bar{э}}}; \quad R'_{КОР} \approx 27 \text{ Ом.}$$

Принимаем $R'_{КОР} = 30$.

6. Определим крутизну проходной характеристики транзистора с коррекцией:

$$S^K = \frac{1}{R'_{КОР}}; \quad S^K = 0,03 \frac{A}{B}.$$

7. Выбираем амплитуду импульса тока, напряжение питания коллектора, величину коэффициента обратной связи, угол отсечки:

$$i_{BBLX \max} = 0,8 \cdot i_{K \text{ доп}} = 16 \text{ mA}, \quad U_{кол} = 0,3 \cdot U_{K \text{ доп}} = 4,5 \text{ В.}$$

$$K_{oc} = 1, \quad \theta = 60^\circ, \quad \alpha_0 = 0,218, \quad \alpha_1 = 0,391, \quad \gamma_0 = 0,102, \quad \cos \theta = 0,5.$$

8. Произведем расчет режима АЭ:

$$I_{K1} = I_{BBLX \max} \cdot \alpha_1(\theta); \quad I_{K1} = 16 \cdot 0,391 \cong 6,3 \text{ mA};$$

$$I_{K0} = I_{BBLX \max} \cdot \alpha_0(\theta); \quad I_{K0} = 16 \cdot 0,218 \cong 3,5 \text{ mA};$$

$$U_{B1}^K = \frac{I_{BBLX \max}}{S^K (1 - \cos \theta)}; \quad U_{B1}^K = \frac{16}{0,3 \cdot 0,5} \cong 1,1 \text{ В};$$

$$U_{K1} = \frac{U_{B1}}{K_{oc}};$$

$$U_{K1} = \frac{1,1}{1} = 1,1 \text{ В};$$

$$R_K = \frac{U_{K1}}{I_{K1}};$$

$$R_K = \frac{1,1}{6,3 \cdot 10^{-3}} \cong 170 \text{ В};$$

$$P_1 = 0,5 U_{K1} \cdot I_{K1};$$

$$P_1 = 0,5 \cdot 1,1 \cdot 6,3 \cdot 10^{-3} \cong 3,5 \text{ мВт};$$

$$P_0 = I_{K0} \cdot U_{K0};$$

$$P_0 = 3,5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} = 15,75 \text{ мВт};$$

$$P_{PAC} = P_0 - P_1;$$

$$P_{PAC} = 15,75 - 3,5 = 12,25 \text{ мВт};$$

$$\eta_s = \frac{P_1}{P_0} \cdot 100 \%;$$

$$\eta_s = \frac{3,5}{15,75} \cdot 100 \% = 22 \%;$$

$$E_{CM} = U_{omc} - U_{B1} \cos \theta;$$

$$E_{CM} = 0,6 - 1,1 \cdot 0,5 = 0,05 \text{ В};$$

$$|E_{CM} + U_{B1}| < U_{B\partial on};$$

$$|0,05 + 0,6| = 0,65 \text{ В} < 3 \text{ В};$$

$$\xi = \frac{U_{K1}}{U_{K0}};$$

$$\xi = \frac{1,1}{4,5} \cong 0,25;$$

$$\xi_{KP} = 1 - \frac{i_{BLYX \max}}{S_\xi \cdot U_{K0}};$$

$$\xi_{KP} = 1 - \frac{16}{20 \cdot 4,5} = 0,82;$$

таким образом, условие $\xi_K \leq 0,5 \xi_{KP}$ выполняется: $\xi = 0,25 < 0,5 \xi_{KP} = 0,41$.

9. Рассчитаем элементы колебательной системы АГ. Выберем величину индуктивности контура $L_3 = 1,0 \text{ мкГн}$ с добротностью $Q_L = 100$. Примем $Q_0 = Q_L = 100$.

Тогда

$$\rho = \omega_H \cdot L_3;$$

$$\rho = 2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 62,8 \text{ Ом};$$

$$C_\Sigma = \frac{1}{\omega_H^2 \cdot L_3};$$

$$C_\Sigma = \frac{1}{(2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^6)^2 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} \cong 2,5 \text{ пФ};$$

$$R_{\text{экв}} = \rho \cdot Q_0;$$

$$R_{\text{экв}} = 62,8 \cdot 100 = 6,28 \text{ кОм};$$

$$p = \sqrt{\frac{R_K}{R_{\text{экв}}}};$$

$$p = \sqrt{\frac{170}{6280}} = 0,165;$$

$$C_1' = \frac{C_\Sigma}{p};$$

$$C_1' = \frac{250}{0,165} = 1500 \text{ пФ};$$

$$C_2 = \frac{C_1'}{K_{oc}};$$

$$C_2 = 1500 \text{ пФ};$$

$$C_3 = \left(\frac{1}{C_\Sigma} - \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1'} \right)^{-1};$$

$$C_3 = \left(\frac{1}{250} - \frac{2}{1500} \right)^{-1} \cong 400 \text{ пФ}.$$

10. Вычисляем емкости $C_{св2}$ и C_1 . Чтобы сопротивление нагрузки R'_H (пересчитанное к выходным электродам транзистора) не мешало заметно добротности контура, достаточно применить $R'_H = 3R_H$. Примем $R'_H = 300$ Ом. Как известно, добротность последовательной цепочки

$$Q_{св} = \frac{X_{св}}{R_H} = \sqrt{\frac{R'_H}{R_H} - 1}, \text{ а емкость } C_{св2} = \frac{1}{\omega_H \cdot R_H \cdot Q_{св}}.$$

Допустим $Q_{св}^2 = 5$, тогда $Q_{св} \cong 2,24$, $R_H = 50$ Ом.

$$C_{св2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 2,24} \cong 140 \text{ пФ.}$$

$$C_1 = C'_1 - C_{св2}; \quad C_1 = 1500 - 140 = 1360 \text{ пФ.}$$

11. Рассчитаем напряжение в цепи смещения.

$$U_B = E_{см} + \frac{3I_{к0}}{S^k} \left[1 + \frac{\cos \theta}{\gamma_0(\theta)} \right]; \quad U_B = 0,05 + \frac{3 \cdot 3,5}{0,03} \left[1 + \frac{0,5}{0,102} \right] = 2,15 \text{ В;}$$

$$R_{ист} = \frac{(3 \dots 5) \cdot B}{4 \cdot S^k} \left[1 + \frac{\cos \theta}{\gamma_0(\theta)} \right]; \quad R_{ист} = \frac{5 \cdot 20}{4 \cdot 0,03} \left[1 + \frac{0,5}{0,102} \right] \cong 4,8 \text{ кОм;}$$

$$\text{Проверка } \left(\frac{C_{\Sigma}}{C_1} \right)^2 \cdot R_{эКВ} = 10 \ll R_{ист} = 4800 \text{ Ом;}$$

$$R_9 = \frac{3R_{ист}}{B}; \quad R_9 = \frac{3 \cdot 4800}{20} = 720 \text{ Ом;}$$

$$R_1 = R_{ист} \cdot \frac{U_{к1}}{U_B}; \quad R_1 = 4,8 \cdot \frac{1,1}{2,15} \cong 2,4 \text{ кОм;}$$

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{U_B}{E_n - U_B}; \quad R_2 = 2,4 \cdot \frac{2,15}{4,5 - 2,15} \cong 2,1 \text{ кОм;}$$

12. Произведем расчет цепи питания.

$$R_{БЛ} = 5 \cdot R_k; \quad R_{БЛ} = 5 \cdot 170 = 850 \text{ Ом;}$$

$$C_{БЛ2} = \frac{1}{\omega_H \cdot 0,1}; \quad C_{БЛ2} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 0,1} = 0,16 \text{ мкФ;}$$

$$E_{II} = U_{к0} + I_{к0} \cdot R_{БЛ}; \quad E_{II} = 4,5 + 3,5 \cdot 850 \cong 7,5 \text{ В;}$$

13. Выбираем варикап KB104E, емкость которого $C_{\epsilon 0} = 100$ пФ при $U_{\epsilon} = 4$ В и добротность его 150 на частоте 10 МГц. Предельные параметры варикапа $U_{\text{дон}} = 45$ В; $P_{\text{дон}} = 100$ мВт. Степень нелинейной вольтфарадной характеристики $m = \frac{1}{2}$.

14. Определяем смещение на варикапе, близкое по величине к напряжению коллекторного питания E_{II} . Пусть $U_{\epsilon 0} = 4,0$ В.

15. Рассчитаем емкость связи варикапа с контурным $C_{\text{св}}$ и произведем уточнение величины емкости АГ C_2 .

Расчет режима варикапа произведем по следующим формулам:

$$U'_{\Omega} = \frac{4}{1+m} \cdot K_{\Gamma}; \quad U'_{\Omega} = \frac{4 \cdot 0,05}{1+0,5} = 0,13;$$

$$U_{\Omega} = U'_{\Omega} (U_{\epsilon 0} + \varphi_{\kappa}); \quad U_{\Omega} = 0,13 \cdot (4 + 0,5) = 0,68;$$

$$\frac{\Delta C_B}{C_{B_0}} = \frac{4m}{1+m} \cdot K_{\Gamma}; \quad \frac{\Delta C_B}{C_{B_0}} = \frac{4 \cdot 0,5}{1+0,5} \cdot 0,05 \cong 0,067;$$

$$K_B = \frac{2 \cdot \frac{\Delta \omega_{\partial}}{\omega_H}}{\frac{\Delta C_B}{C_{\epsilon 0}}}; \quad K_B = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,067} = 0,015;$$

$$\rho_{\epsilon} = \sqrt{\frac{K_B \cdot C_{\Sigma}}{C_{\epsilon 0}}}; \quad \rho_{\epsilon} = \sqrt{\frac{0,015 \cdot 250}{150}} = 0,158;$$

$$U_{\epsilon 1} = \frac{\rho_{\epsilon}}{\rho} \cdot U_{\kappa 1}; \quad U_{\epsilon 1} = \frac{0,158}{0,165} \cdot 1,1 = 1,045 \text{ В};$$

$$C_{\text{св}} = \frac{U_{\epsilon 1}}{U_{B_1} - U_{\epsilon 1}} \cdot C_{\epsilon 0}; \quad C_{\text{св}} = \frac{1,045}{0,055} \cdot 150 = 285 \text{ пФ};$$

$$C'_2 = C_2 - \frac{C_{\text{св}} \cdot C_2}{C_{\text{св}} + C_2}; \quad C'_2 = 1500 - 285 = 1215 \text{ пФ}.$$

С учетом влияния варикапа на контур вместо рассчитанной емкости C_2 в АГ нужно включить $C'_2 = 1215$ пФ.

16. Рассчитаем резистивный делитель $R_1 R_2$ в цепи смещения варикапа, учитывая следующие условия:

$$1) E_{II} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4 \text{ В}; \quad 2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \ll \frac{1}{\Omega_{\text{max}} \cdot C_{\epsilon 0}} = 470 \text{ кОм}.$$

Второе условие вводится для того, чтобы нагрузка источника модулирующего сигнала была постоянной в полосе частот $F_{\min} \dots F_{\max}$.

$$\text{Примем } \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 5 \text{ кОм,}$$

$$\text{тогда } R_1 = 5,6 \text{ кОм, } R_2 = 45,5 \text{ кОм.}$$

3. Упражнения и задачи

1. Нарисуйте временную и спектральную диаграммы частотно-модулированного колебания, если модулирующее напряжение $u_{\Omega} = U_{\Omega} \cos \Omega t$.

2. Можно ли по осциллограмме выявить различие между ЧМ- и ФМ-колебаниями, если модулирующее напряжение $u_{\Omega} = U_{\Omega} \cos \Omega t$?

3. Определите распределение энергии по спектру частот при ЧМ и ФМ.

4. Поясните сходство и различие в спектре АМ и ФМ. Запишите выражение, позволяющее определить требуемую полосу частот при АМ и ФМ для обеспечения неискаженной передачи.

5. Объясните, чем обусловлена повышенная помехозащищенность угловой модуляции по сравнению с АМ? Как зависит помехозащищенность от индекса модуляции?

6. Перечислите основные недостатки косвенного способа получения ЧМ.

7. Какой элемент, кроме варикапа, можно использовать в качестве частотного модулятора? Каким образом удаётся обеспечить требуемую стабильность частоты при прямом способе получения ЧМ?

8. Определите коэффициент паразитной АМ генератора, если автогенератор работает в недонапряженном режиме, $Q_k = 150$, $Q_B = 50$, при 1) $\Delta f / f_0 = 0,001$; 2) $\Delta f / f_0 = 0,002$.

9. Частотная модуляция получается путём преобразования фазовой. Какое умножение частоты потребуется для получения $\Delta F_0 = 50$ кГц, если полоса модулирующих частот $F = 50 - 15000$ Гц? Максимальная девиация фазы равна: а) $0,5$ рад, б) 35° , в) 140° .

10. Постройте структурную электрическую схему вещательного ЧМ-передатчика, работающего по схеме преобразования ФМ в ЧМ, если $f_0 = 45$ МГц, $\Delta f_0 = 50$ кГц, $F = 30 - 15000$ Гц, $\Delta \varphi = 2,5$ рад.

11. Какой спектр частот должен пропускать первый и окончательный умножители частот в структурной схеме по задаче 10?

12. Определите коэффициент перекрытия по емкости кремниевого варикапа Д901Б ($\gamma = -1/2$) при изменении напряжения смещения: а) от 0 до 5 В; б) от 5 до 10 В.

13. Определите сопротивление потерь варикапа Д901А при $Q = 25^\circ$, $f_0 = 50$ МГц, $C = 30$ пФ.

14. Определите добротность варикапа на частотах $f_{01} = 10$ МГц и $f_{02} = 100$ МГц, если его добротность на частоте $f_0 = 50$ МГц, $Q = 30$.

15. Определите сопротивление потерь r и Эквивалентное сопротивление R , варикапа KB109А, если на $f_0 = 50$ МГц, $Q = 300$. Емкость перехода $C = 12$ пФ.

16. Определите коэффициент паразитной АМ при ЧМ генератора с помощью варикапа, если генератор работает в недонапряженном режиме при $f_0 = 50$ МГц, $\Delta f_0 = 0,5$ МГц, $Q_k = 50$, $Q = 230$ добротность емкости закрытого p - n -перехода.

17. Определите полосу пропускания $2\Delta f_{0,7}$ и Q_k усилителя ЧМК, при которой коэффициент нелинейных искажений не превысит: а) 0,3%; б) 0,5%; в) 1%; если $\Delta f_0 = 50$ кГц, $F = 30-15000$ ГГц, $f_0 = 73,1$ МГц.

18. Определите полосу пропускания $2\Delta f_{0,7}$ и Q_k резонансного усилителя ЧМК, при которой коэффициент частотных искажений K не превысит: а) 1,03%; б) 1,05%; в) 1,1%; если $\Delta f_0 = 50$ кГц, $F = 30-15000$ ГГц; $\lambda = 4,1$ м.

19. Определите K_{H_2} в ЧМ по схеме рис. 6.2, если $\Delta f_{0\Omega} = 1,7$ кГц, $\Delta f_0 = 21,2$ кГц.

20. Определите емкость C_{MO} варикапа с резким p - n -переходом в ЧМ, собранном по схеме рис. 6.2, а, когда: $K_{H_2} \leq 4$ %, $\Delta f_{0\Omega} \leq 1$ кГц, $f_0 = 25$ МГц, $\Delta f_0 = 15$ кГц, $C_k = 6$ пФ, $\rho = 0,1$.

21. Определите амплитуду модулирующего напряжения U_Ω , если $E_{MO} = 8$ В. Исходные данные аналогичны задаче 20.

22. Определите нестабильность напряжения смещения модулятора, при которой уход частоты генератора не превысит 500 Гц. Исходные данные аналогичны задаче 20.

23. Определите коэффициент включения ρ модулятора при емкостной связи с генератором (рис. 6.2,б) при которой коэффициент нелинейных искажений модулирующего сигнала $K_{H_2} \leq 2$ %. В модуляторе использован варикап Д901Б, емкость варикапа $C_k = 30$ пФ при $E_{MO} = 6$ В. Емкость контура $C_k = 4$ пФ, $f_0 = 30$ МГц, $\Delta f_0 = 12$ кГц.

24. Определите сдвиг центральной части автогенератора под воздействием модулирующего напряжения, если коэффициент включения модулятора $\rho = 0,04$. Исходные данные аналогичны задаче 23.

25. Определите крутизну модуляционной характеристики и амплитуды модулирующего напряжения частотного модулятора (см. задачу 23), если $\rho = 0,04$.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

Цифровые модуляторы

1. Общие сведения

Общим у всех передатчиков, работающих в беспроводных радиоприемах, является то, что выходной сигнал формируется на высокочастотной несущей. Отличительным признаком цифрового радиопередатчика является наличие в его составе цифрового модулятора или манипулятора.

Модуляция при передаче дискретных сигналов называется манипуляцией. В зависимости от параметра несущего колебания, который подвергается изменению по закону передаваемого сообщения (первичный сигнал), различают следующие основные виды манипуляции: амплитудную (АМ_н), частотную (ЧМ_н), фазовую (ФМ_н). При манипуляции закодированный первичный сигнал представляется в виде непрерывно чередующихся плюсов или минусов – посылок (токовых или бестоковых). Длительность одной посылки (паузы) равна τ .

Важнейшими характеристиками сигнала манипуляции являются: скорость передачи $U_M = \frac{1}{\tau}$, основная частота манипуляции $f_{M_n} = \frac{1}{2\tau}$, ширина полосы частот, занимаемой сигналом манипуляции Π_{M_n} , МГц $\geq V$ (бит/с), где V – скорость передачи сигнала манипуляции.

При амплитудной манипуляции один электрический сигнал кода соответствует излучению полной энергии передатчика (посылка), а другой сигнал – отсутствию этого излучения (пауза). Результирующий сигнал при АМ_н равен

$$s(t) = \begin{cases} A \cos 2\pi \cdot f_c t & \text{- двоичная единица;} \\ 0 & \text{- двоичный ноль,} \end{cases}$$

где $A \cos 2\pi f_c t$ – колебание несущей частоты.

В общем случае радиосигнал при амплитудной радиотелеграфии описывается законом:

$$s(t) = A \cdot [1 + V(t)] \cos 2\pi \cdot f_c t.$$

При частотной телеграфии токовой посылке соответствует работа передатчика на одной частоте, а бестоковой – работа на другой частоте. Результирующий сигнал равен

$$s(t) = \begin{cases} A \cos 2\pi \cdot f_1 t & \text{- двоичная единица;} \\ A \cos 2\pi \cdot f_2 t & \text{- двоичный ноль,} \end{cases}$$

где f_1 и f_2 – частоты, смещенные от несущей частоты f_c на величины, равные по модулю, но противоположные по знаку. Разность частоты $f_2 - f_1 = 2\Delta f_0$ называется частотным сдвигом или разносом частот. Высокочастотные колебания при таких изменениях частоты можно рассматривать как колебания с частотой модуляции, у которого модулирующий сигнал имеет форму прямоугольных импульсов, а максимальная девиация частоты при бинарной ЧМ_н равна Δf_2 .

При фазовой манипуляции токовым посылкам и паузам соответствуют колебания, различающиеся по фазе на 180° . Такая манипуляция называется также бинарной фазовой манипуляцией. Получающийся сигнал имеет следующий вид: при бинарной ФМ_н

$$s(t) = \begin{cases} A \cos 2\pi \cdot f_c t & \text{двоичная единица;} \\ A \cos(2\pi \cdot f_c t + \pi) & \text{двоичный ноль.} \end{cases} = \begin{cases} A \cos 2\pi \cdot f_1 t & \text{двоичная единица;} \\ -A \cos 2\pi \cdot f_2 t & \text{двоичный ноль.} \end{cases}$$

Поскольку сдвиг фазы на 180° (π) эквивалентен умножению косинусоиды на минус 1, то это позволяет использовать удобную формулировку. Если имеется поток битов и $V(t)$ определяется дискретной функцией, значение которой равно +1 при передаче единицы (1) и минус единицы (-1) при передаче нуля, то переданный сигнал можно определить следующим образом:

$$s(t) = A \cdot V(t) \cos 2\pi \cdot f_c t.$$

Альтернативной формой двухуровневой ФМ является относительная ФМ или дифференциальная ОФМ–2(DPSK) - в международной кодировке.

При ОФМ–2 различие в приеме 0 – 1 производится по относительному изменению фазы в тактовые моменты. При ОФМ фаза φ и управляющее напряжение V_y изменяется всякий раз, когда на манипулятор поступает очередная единица цифровой импульсной последовательности ЦИС. Если $V_y = 0$, то фаза сигнала остается неизменной. Таким образом, отпадает необходимость в передаче опорного сигнала и упрощается демодуляция. Для формирования сигнала ОФМ–2 используются балансные модуляторы.

При оценке эффективности различных методов формирования цифровых радиосигналов нужно знать влияние различных факторов на ширину полосы пропускания сигнала. Данный параметр прежде всего зависит от способов манипуляции и фильтрации, применяемых для создания полосового сигнала.

При амплитудной манипуляции (ASK – в международной классификации) ширина полосы пропускания, как было отмечено выше, непосредственно связана со скоростью передачи ЦИС и определяется соотношением

$$П_{AT} = (1 + \epsilon)B, \quad (7.1)$$

где B – скорость передачи битов;

ϵ – коэффициент, зависящий от способа фильтрации полосового сигнала; $0 \leq \epsilon \leq 1$.

Формула (1) применима и для определения полосы сигнала при бинарной фазовой манипуляции (PSK).

При бинарной частотной манипуляции (FSK) ширину полосы можно найти с помощью выражения

$$П_{CT} = 2\Delta f + (1 + \epsilon)B, \quad (7.2)$$

где $2\Delta f = f_2 - f_1$ – сдвиг частот или частотный разнос.

В формуле (2) при использовании очень высоких частот (МГц) полоса определяется в основном первым слагаемым с Δf . На низких частотах (Гц) доминирует второе слагаемое $(1 + \epsilon)B$.

Для сужения полосы канала используют многоуровневые методы манипуляции: ОФМ–4, ОФМ–8, ММС, КАМ–16, КАМ–64 и т.д.

При реализации многофазной передачи сигналов (MPSK) можно добиться значительно более эффективного использования полосы:

$$\Pi_{MPSK} = \left(\frac{1+b}{L} \right) B = \left(\frac{1+b}{\log_2 M} \right) B,$$

где L – число битов, закодированных в одной сигнальной посылке;

M – количество различных посылок.

Для многоуровневой частотной манипуляции (MFSK) для расчета полосы сигнала имеется следующая формула:

$$\Pi_{MFSK} = \left[\frac{(1+b)M}{\log_2 M} \right] B.$$

При передаче цифровых сигналов эффективность использования спектра радиосигнала оценивается отношением

$$S = \frac{B}{\Pi_M},$$

где Π_M – ширина полосы пропускания при разных видах манипуляции. S равна числу битов ЦИС в секунду (B), приходящихся на 1 Гц полосы радиотракта.

В качестве меры производительности цифровых систем связи используется

также параметр $\frac{E_g}{N_0}$ – отношение энергии сигнала на 1 бит к плотности шумов на 1 Гц. Так как $E_g = P \cdot \tau_u$ (где P – мощность сигнала в Вт; τ_u – время передачи

одного бита), а $B = \frac{1}{\tau_u}$, то $\frac{E_g}{N_0} = \frac{P/B}{N_0} = \frac{P}{kTB}$,

где k – постоянная Больцмана, $k = 1,3808 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

T – температура в Кельвинах (абсолютная температура).

Связь параметра $\frac{E_g}{N_0}$ с достижимой спектральной эффективностью $\frac{B}{\Pi_M}$ выражается формулой

$$\frac{E_g}{N_0} = \frac{\Pi_M}{B} \cdot \left(2^{B/\Pi_M} - 1 \right).$$

При оценке различных систем кодировки очень важными являются сведения об их производительности в присутствии помех. На рис.7.1 представлена зависимость частоты появления битовых ошибок от отклонения $\frac{E_g}{N_0}$, для различных схем кодирования.

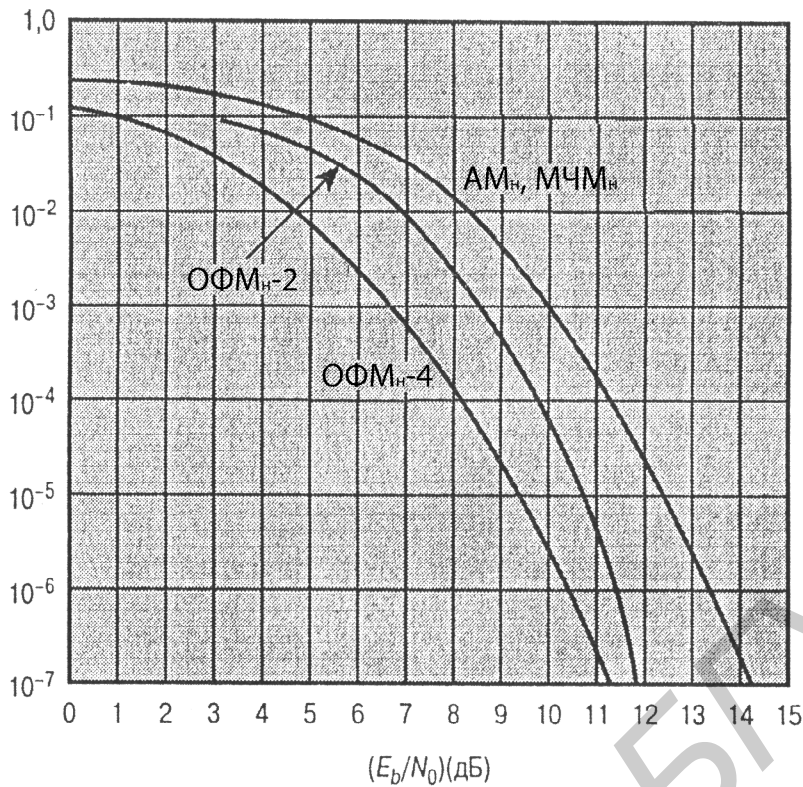


Рис. 7.1. Теоретическая частота появления битовых ошибок для различных схем кодирования

2. Пример разработки цифрового модулятора

Исходные данные:

Составьте структурную схему устройства для формирования сигнала ОФМ–8 и оцените его помехоустойчивость в сравнении с КАМ–8.

Решение: 1. Построим векторную диаграмму сигнала ОФМ–8.

Прежде всего необходимо отметить, что «сигнальные конструкции» сложных манипулированных по определенному закону сигналов отличаются симметрией. Симметричный сигнал с любым числом состояний можно сформировать, суммируя два ортогональных (сдвинутых по фазе на 90°) напряжения высокой частоты $U_c = V_c \cos \omega t$ и $U_s = V_s \sin \omega t$, если их амплитуды V_c и V_s изменять по регулярному закону.

На рис. 7.2 показана диаграмма состояний выходного сигнала ОФМ–8.

Из векторной диаграммы следует, что для получения сигнала ОФМ–8 управляющие напряжения V_c и V_s должны принимать три различных уровня: +1, –1 и 0 «запрет», когда соответствующий сигнал U_c и U_s обращается в нуль.

Трехуровневые ВЧ-сигналы U_c и U_s можно получить на выходе балансных модуляторов, если на них подавать трехуровневые управляющие напряжения V_c и V_s .

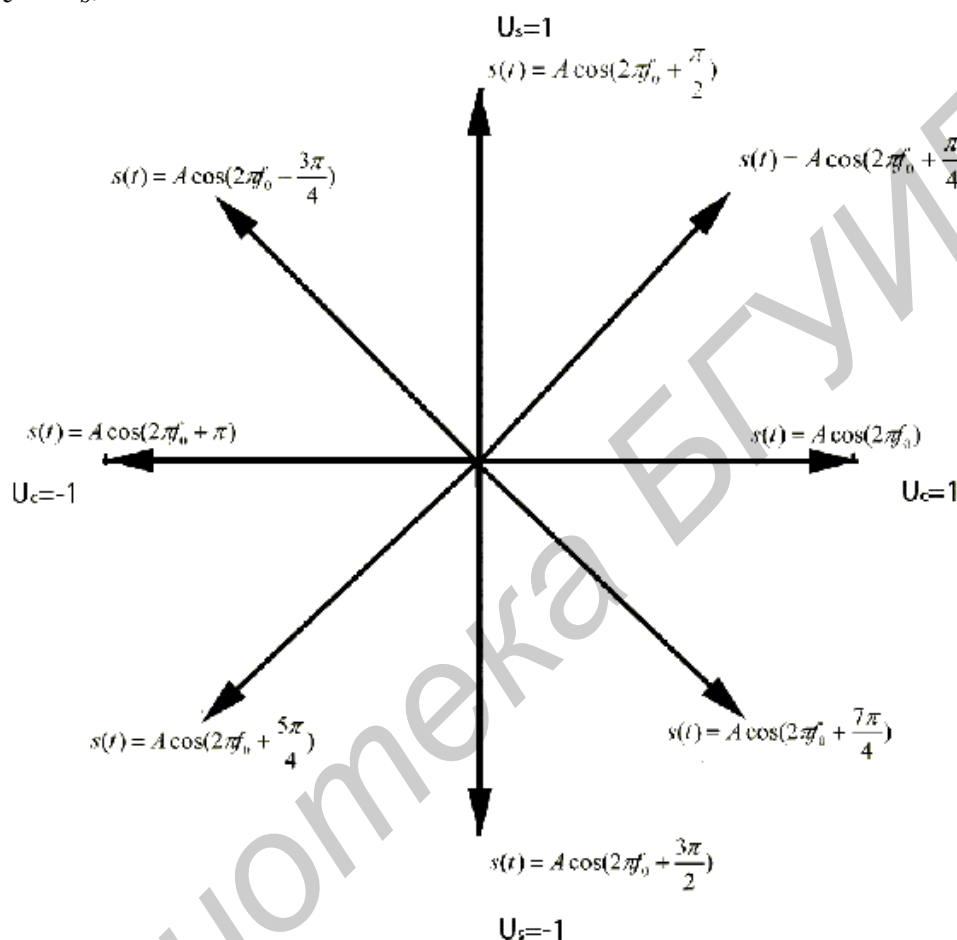


Рис. 7.2. Векторная диаграмма сигнала ОФМ-8

Входной модулирующий сигнал, как известно, представляет цифровую импульсную последовательность, в которую заложено сообщение. Эту последовательность необходимо преобразовать в параллельный код, чтобы получить управляющие цифровые напряжения V_1, V_2, V_3 , для чего потребуется преобразователь последовательного кода в параллельный (ПК). Для управления балансным модулятором нужен трехуровневый сигнал U_c и U_s , который вырабатывается преобразователем типа «код–напряжение».

2. Составим таблицу соответствия управляющих сигналов V_c и V_s на выходе ЦАП входным цифровым сигналам V_1, V_2, V_3 .

Таблица 7.1

Номер позиции и код соответствия напряжения V_1, V_2, V_3	Уровень напряжения на входе БМ	Фазовые положения выходного сигнала
1. 000	$V_c = 0 \quad V_s = -1$	$3\pi/2$
2. 001	$V_c = -1 \quad V_s = -1$	$5\pi/4$
3. 011	$V_c = -1 \quad V_s = 0$	π
4. 010	$V_c = -1 \quad V_s = +1$	$3\pi/4$
5. 110	$V_c = 0 \quad V_s = +1$	$\pi/2$
6. 111	$V_c = +1 \quad V_s = +1$	$\pi/4$
7. 101	$V_c = +1 \quad V_s = 0$	0
8. 100	$V_c = +1 \quad V_s = -1$	$7\pi/4$
9. 000	$V_c = 0 \quad V_s = -1$	$3\pi/2$

Табл. 7.1 и векторная диаграмма (рис. 7.2) дают возможность определить следующий порядок формирования сигналов: старший разряд цифрового кода вырабатывает сигнал V_1 , который в свою очередь используется для получения управляющего напряжения V_c . По закону среднего разряда изменяется сигнал V_2 , в соответствии с которым формируется управляющее напряжение V_s . Младший разряд цифрового кода определяет порядок изменения сигнала V_3 .

Табл. 7.1 позволяет выявить еще одну особенность образования сигналов. Управляющее напряжение V_c на входе БМ1 меняется так же, как и V_1 , (следует иметь в виду, что значению кода $V_1 = 0$ соответствует напряжение $V_c = -1$, а при $V_1 = 1$ – напряжение $V_c = +1$), однако если $V_3 = 0$, то при изменении состояния V_1 (с «0» на «1» и наоборот) напряжение V_c должно принять значение нуля, т.е. сигнал V_3 «корректирует» напряжение V_c . Эти особенности формирования сигналов V_1, V_3 и напряжения V_c необходимо положить в основу работы преобразователя «код–напряжение» Пр1.

Характерно, что при осуществлении инверсного преобразования сигнала V_3 формирование напряжения V_s происходит по той же схеме, как и напряжение V_c .

3. Разработаем алгоритм работы преобразователей цифрового кода в управляющее напряжение V_c и V_s .

На выходе преобразователя Пр1 устанавливается трехуровневое напряжение Γ_c , если на его вход подаются одновременно кодовые сигналы V_1 и V_3 в соответствии с табл. 7.2.

Таблица 7.2

V_1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
V_2	0	1	1	1	0	1	1	0	0
V_c	0	-1	-1	-1	0	+1	+1	+1	0

На выходе преобразователя Пр_2 устанавливается трехуровневое U_s , если на его вход подаются одновременно кодовые сигналы V_2 и V_3 в соответствии с табл. 7.3.

Таблица 7.3

V_1	0	0	1	1	1	1	0	0	0
V_2	1	0	0	1	1	0	0	1	1
V_s	-1	-1	0	+1	+1	+1	0	-1	-1

4. Составим структурную схему цифрового модулятора сигнала ОФМ-8.

Цифровой модулятор должен содержать преобразователь кода (ПК), 2 преобразователя кода в управляющее напряжение (Пр_1 , Пр_2), инвертор (И), 2 балансных модулятора БМ1 и БМ2, фазосдвигающее устройство (φ), генератор радиочастоты (Γ), сумматор (Σ). Структурная схема модулятора имеет следующий вид:

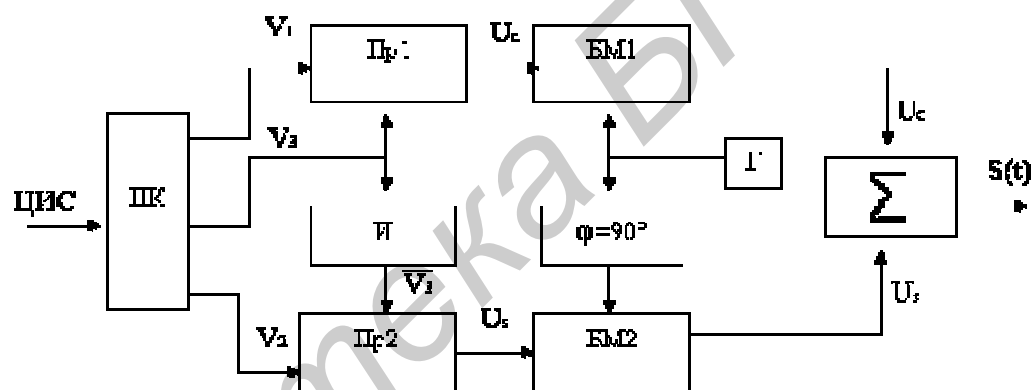


Рис. 7.3. Структурная схема модулятора

Помехоустойчивость сигналов с тем или иным видом цифровой модуляции оценивается по расстоянию d между ближайшими точками на амплитудно-фазовой диаграмме сигналов. Чем больше расстояние d между ближайшими точками созвездия на комплексной плоскости, тем выше помехоустойчивость. В нашем случае помехоустойчивость обоих сигналов примерно одинакова.

5. Построим сигнальную конструкцию («созвездие») сигнала ОФМ-8 и оценим ее помехоустойчивость.

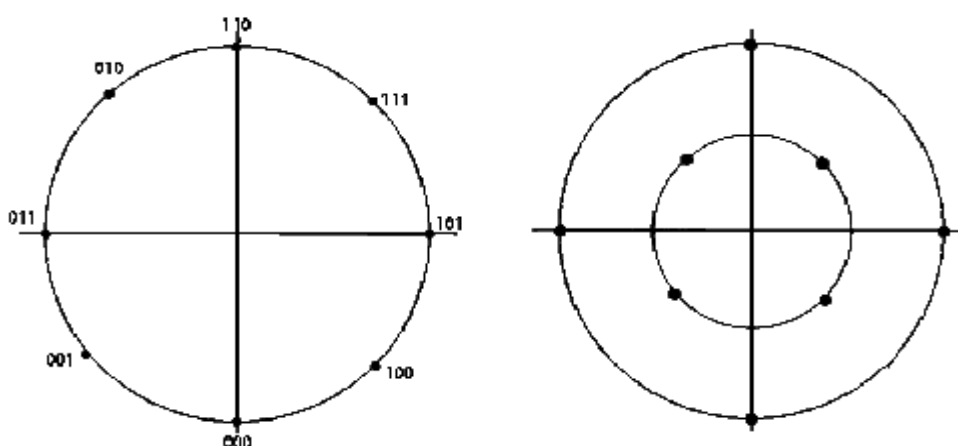


Рис. 7.4. Созвездие сигнала ОФМ–8 (а); созвездие сигнала КАМ–8 (б)

3. Упражнения и задачи

1. Назовите виды манипуляций.
2. Что понимается под скоростью манипуляции?
Как определяется частота манипуляции?
3. От чего зависит полоса пропускания манипулированного сигнала?
Приведите примеры.
4. Нарисуйте схему осуществления амплитудной манипуляции и поясните её работу.
5. Поясните особенности частотной манипуляции. Нарисуйте графики частотно–манипулированных колебаний.
6. Нарисуйте схему осуществления частотной манипуляции и поясните её работу.
7. В чём состоит сущность фазовой манипуляции? Составьте схему получения бинарной фазовой манипуляции.
8. В чём состоит сущность относительной (дифференциальной) фазовой манипуляции? Почему этот вид манипуляции получил распространение? Нарисуйте графики сигнала при ОФМ–2.
9. Назовите три основных преимущества цифровой передачи перед аналоговой. Каковы её недостатки?
10. Как при амплитудной манипуляции представляются двоичные значения и какое ограничение имеет данный подход?
11. Что такое многоуровневая манипуляция? Перечислите её достоинства.
12. Составьте схему цифрового модулятора для формирования сигнала ОФМ–4 (QPSK) и нарисуйте амплитудно–фазовую диаграмму (“созвездие”) для этого сигнала.
13. Составьте схему цифрового модулятора для формирования сигнала при квадратурной манипуляции КАМ–16 и поясните его работу.
14. Нарисуйте структурную схему цифрового модулятора для формирования сигнала ЧММС. В чём состоит особенность его работы?
15. Колебание высокой частоты должно использоваться в двух различных схемах передачи сигнала: ОФМ–2 и ОФМ–4. Длительность сигнальной посылки равна 10^{-5} с. Определите отношение энергии сигнала на 1 бит к плотности шумов на 1 Гц (E_g / N_0) (в Дб) для каждого случая, если уровень принятого сигнала $S(t) = 0,005 \sin(2\pi \cdot 10^6 t + \theta) B$, а измеренная в приемнике мощность шума равна $2,5 \cdot 10^{-8}$ Вт.
16. Определите отношение сигнал/шум, необходимое для получения эффективности полосы 1,0 при амплитудной, частотной, фазовой и квадратурной фазовой манипуляциях. Частоту появления ошибок считайте равной 10^{-5} .

17. Оцените полосу частот, требуемую для передачи сигналов ОФМ–4 со скоростью 2400 бит/с и сигналов ОФМ–8 со скоростью 4800 бит/с, если ширина доступной полосы равна 2400 Гц, а диапазон передаваемых частот от 600 до 3000 Гц. Достаточно ли этой полосы?

18. Составьте схему распределения частот для каждой возможной L-битовой комбинации при многоуровневой частотной манипуляции, если несущая $f_N = 250$ кГц, частотный разнос $f_d = 25,0$ кГц для $M = 4$ и $M = 8$ (M – число различных сигнальных посылок). Какую скорость передачи может поддерживать схема?

19. Уровень мощности сигнала, полученного цифровой системой связи, равен 15125 Вт, а эффективная шумовая температура приемника – 1500°К. Найдите отношение E_b/N_0 для канала связи со скоростью передачи 2400 бит/с.

20. Чему равна эффективность использования частотной, амплитудной, фазовой и квадратурной фазовой манипуляции при скорости появления ошибок 10^{-6} в канале с отношением сигнал/шум равным 12 Дб?

21. Оцените ширину полосы для амплитудной и частотной манипуляций, если скорость передачи данных равна 2400 бит/с. При рассмотрении частотной манипуляции считайте, что используются частоты 50 кГц и 55 кГц.

22. Определите минимальное межточечное расстояние $d_{мин}$, средний квадратичный уровень сигнала σ , нормированное расстояние $d_{мин}/\sigma$ для 8-позиционной амплитудной, фазовой и квадратурной манипуляции. Сравните их помехоустойчивость (т.е. меньшую вероятность ошибки).

23. Перечислите параметры, которые используются для оценки эффективности цифровых систем. Охарактеризуйте их. Приведите примеры.

24. Составьте упрощенную структурную схему цифрового передатчика радиорелейной линии связи. Поясните принцип её работы и нарисуйте графики работы манипулятора.

25. Покажите, что схема демодулятора сигнала с КАМ, изображенная на рис. 7.5, восстанавливает два сигнала $d_1(t)$ и $d_2(t)$, которые затем могут объединиться с целью восстановления сигнала.

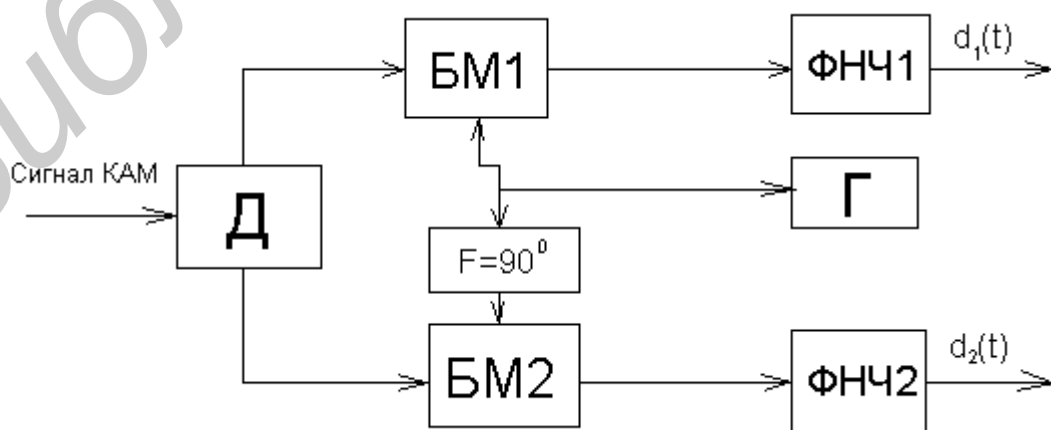


Рис. 7.5. Демодулятор сигнала с КАМ:

БМ1, БМ2 – балансные модуляторы; Д – делитель; F = 90° – фазосдвигающее устройство; Г – генератор радиосигналов; ФНЧ1, ФНЧ2 – фильтры низких частот

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8

Импульсные модуляторы

1. Общие сведения

Импульсная модуляция широко применяется в радиолокации, радиовещании, а также в многоканальных радиорелейных и космических линиях связи. Виды импульсной модуляции характеризуются скважностью $q = T_{\text{п}}/\tau$, где $T_{\text{п}}$ и τ – период повторения и длительность импульса.

В радиолокации типична работа с высокими скважностями до 1000 и более, а в радиорелейных линиях связи с низкими ($q = 2 \dots 10$).

Режим активного элемента (АЭ) при импульсной модуляции описывается импульсными значениями тока ($I_{\text{вых.и}}$), мощности ($P_{1и}$) и др., а также средними значениями $I_{\text{вых.ср}}$, $P_{1ср}$ и др. Средняя мощность определяет тепловой режим передатчика. Для прямоугольных импульсов импульсные и средние значения связаны следующими соотношениями:

$$I_{\text{вых.ср}} = I_{\text{вых.и}}/q; P_{1ср} = P_{1и}/q.$$

Для питания АЭ при импульсной модуляции используют модуляционные устройства (МУ) с частичным или полным разрядом накопителя энергии (НЭ). По существу МУ являются импульсными источниками питания для АЭ. В качестве накопителей энергии применяют либо ёмкости, либо искусственные длинные линии (ИДЛ). В первом случае в качестве коммутатора (ключа) используются импульсные модуляторные лампы или транзисторы, а во втором – приборы ионного типа (тиратроны) или полупроводниковые приборы (тиристоры).

Нагрузкой МУ являются активные элементы (магнитрон, амплитрон, пролётный клистрон, электронная лампа и др.), основными параметрами которых являются:

E и $E_{\text{пор}}$ – номинальное и пороговое напряжения;

$I_{0и}$ – номинальный ток в импульсе;

$R_0 = E/I_{0и}$ – статическое сопротивление (сопротивление по постоянному току) нагрузки;

$R_d = dE/dI_{0и}$ – динамическое (дифференциальное) сопротивление нагрузки.

Модуляционные устройства вместе с АЭ (нагрузочной) называют импульсными модуляторами (ИМ).

Резистивная схема ИМ с частичным разрядом накопителя показана на

рис.8.1, а форма модулирующего импульса на нагрузке – на рис. 8.2.

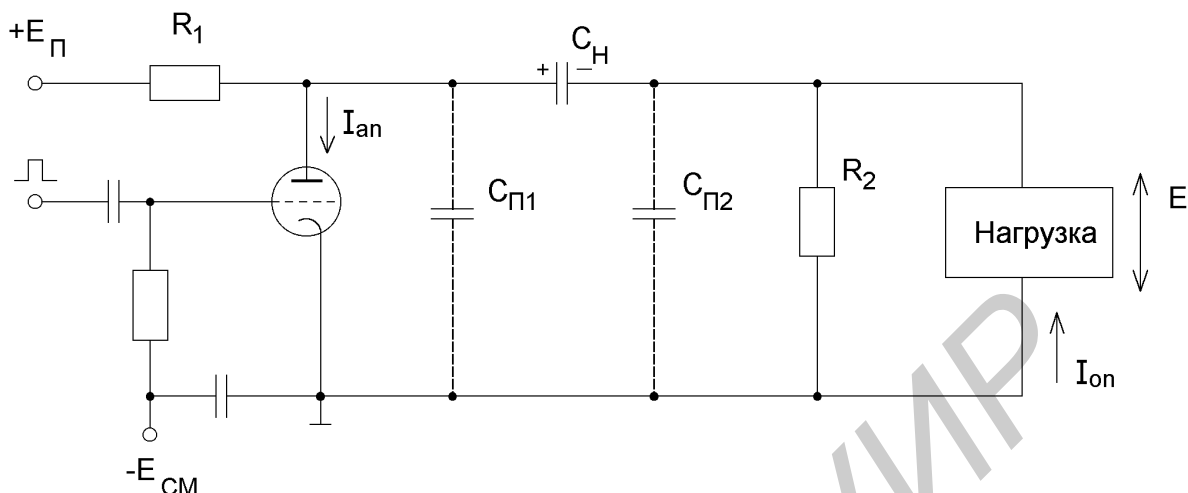


Рис.8.1. Резистивная схема импульсного модулятора:

$C_{П1}$, $C_{П2}$ – паразитные ёмкости схемы; $I_{ан}$ – анодный ток коммутатора (ключа); $I_{он}$ – номинальный ток нагрузки; E – напряжение на нагрузке

На рис. 8.1 пунктиром показаны паразитные ёмкости схемы ($C_{П1}$, $C_{П2}$). Суммарная паразитная ёмкость схемы равна $C_{П} = C_{П1} + C_{П2}$. На рис. 8.2 E_{max} – амплитуда импульса; $\Delta E = E_{max} - E_{min}$ – спад вершины импульса; $\tau_{ф}$ – длительность фронта импульса; $\tau_{ср}$ – длительность среза импульса; $\tau_{и}$ – длительность импульса; $\tau_{в}$ – длительность вершины импульса.

Длительность фронта модулирующего импульса для АЭ магнетронного типа (резко нелинейная нагрузка):

$$\tau_{ф} = EC_{П}/I_{ан} = R_0 I_{он} C_{П}/I_{ан};$$

приборов триодного типа (линейная нагрузка):

$$\tau_{ф} = 3 R_0 C_{П};$$

приборов типа «О» (слабо-нелинейная нагрузка):

$$\tau_{ф} = 2,5 R_0 C_{П},$$

где $I_{ан}$ – анодный ток коммутатора.

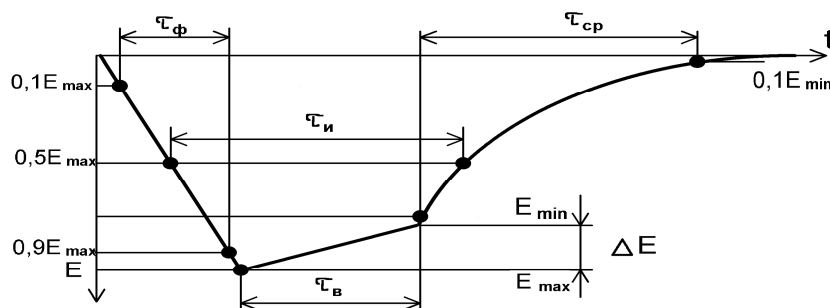


Рис. 8.2. Форма импульса и

Длительность среза импульса в резистивном модуляторе равна:

при линейной нагрузке $\tau_{\text{ср}} = 2,2R_1R_0C_{\text{п}}/(R+R_0)$;

при слабо-нелинейной нагрузке $\tau_{\text{ср}} = 3R R_0C_{\text{п}}/(R+R_0)$;

при резко-нелинейной нагрузке $\tau_{\text{ср}} = 3R C_{\text{п}}$;

где $R = R_1R_2/(R_1+R_2)$.

Изменение напряжения на накопительном конденсаторе за время импульса:

$$\Delta E = E_{\text{max}} - E_{\text{min}} = I_{\text{ои}} \tau_{\text{и}} / C_{\text{н}} = E_{\text{max}} \tau_{\text{и}} / R_0 C_{\text{н}}.$$

При этом относительное изменение напряжения на нагрузке (коэффициент формы) определяется:

$$\epsilon = \Delta E / E_{\text{max}} = \tau_{\text{и}} R_{\text{д}} / C_{\text{н}} (R_{\text{д}} + R_{\text{и}}) R_0;$$

где $R_{\text{и}}$ – динамическое (дифференциальное) сопротивление модуляторной лампы;

$R_{\text{д}}$ – дифференциальное сопротивление нагрузки модулятора.

Схемы модуляторов с полным разрядом накопителя отличаются по типу линии (с распределёнными параметрами или искусственные; однородные или неоднородные; одинарные, двойные или учетверённые и т.д.); по виду заряда (резонансный или линейный) и по виду источника питания. Эти отличия отражаются в названиях схем. На рис. 8.3 показана схема модулятора с резонансным зарядом одинарной цепочечной искусственной линии через диод от источника постоянного напряжения.

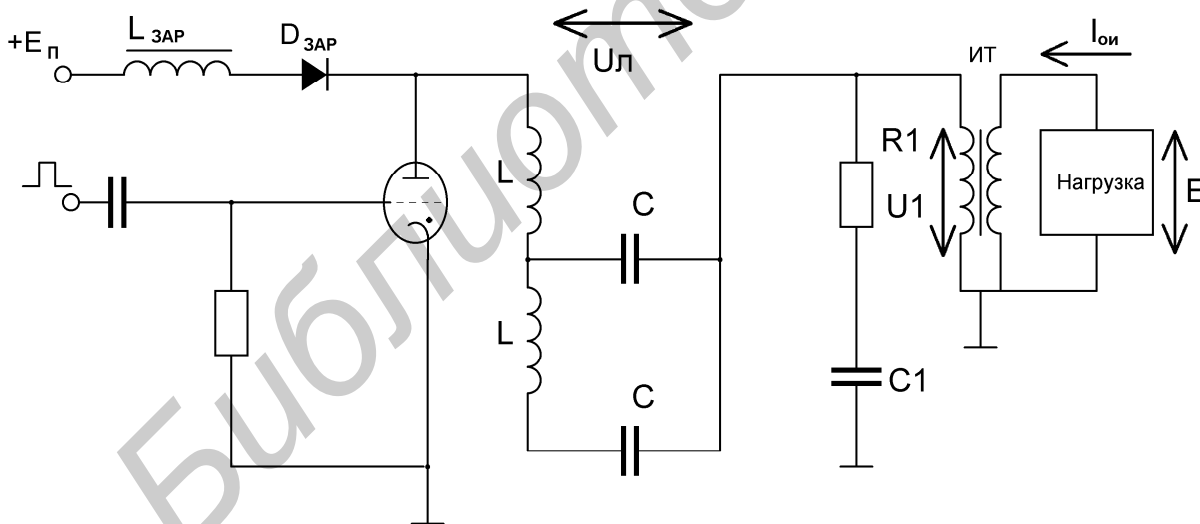


Рис. 8.3. Импульсный модулятор с полным разрядом накопителя:

$L_{\text{зар}}$ – зарядный дроссель; $D_{\text{зар}}$ – зарядный диод; L и C – индуктивность и ёмкость ячейки формирующей линии; ИТ – импульсный трансформатор; U_1 и E – амплитуды импульсов напряжения на первой обмотке ИТ и на нагрузке; $U_{\text{л}}$ – напряжение на линии

2. Пример расчета модулятора

Рассчитать модуляционное устройство с полным разрядом накопителя, заряжаемого от источника постоянного тока, для магнетронного генератора (рис. 8.3).

Исходные данные:

Напряжение на нагрузке(E)	4,8 кВ
Ток нагрузки в импульсе (I_{on})	4 А
Длительность импульса(τ)	2 мкс
Частота следования импульсов(F)	400 Гц

Форма выходного импульса:

τ_{ϕ}	0,15 τ
$\tau_{ср}$	0,3 τ
ΔE	0,01E

2.1. Расчет разрядной цепи накопителя

Сопротивление магнетрона постоянному току

$$R_0 = \frac{E}{I_{on}} = \frac{4800}{4} = 1200 \text{ Ом.}$$

Выбираем $\rho_L = 75 \text{ Ом.}$

Коэффициент трансформации импульсного трансформатора

$$n = \sqrt{\frac{R_0}{\rho_L}} = \sqrt{\frac{1200}{75}} = 4.$$

Напряжение на первичной обмотке трансформатора

$$U_1 = \frac{E}{n\sqrt{\eta_T}} = \frac{4800}{4\sqrt{0,91}} = 1260 \text{ В.}$$

где η_T – КПД импульсного трансформатора. Принимаем $\eta_T = 0,91$.

Ток в первичной обмотке трансформатора

$$I_1 = \frac{n \cdot I_{on}}{\sqrt{\eta_T}} = \frac{4 \cdot 4}{\sqrt{0,91}} = 15,2 \text{ А.}$$

Напряжение на накопительной линии

$$U_L = \frac{U_1}{\beta\sqrt{\eta_P}} = \frac{1260}{0,5\sqrt{0,9}} = 2660 \text{ В,}$$

где η_P – КПД разрядной цепи. Принимаем $\eta_P = 0,9$;

β – коэффициент перепада напряжения на линии при её разряде на нагрузку, равный

$$\beta = \frac{R_0'}{R_0' + \rho_L}; R_0' = \frac{R_0}{n^2} = \rho_L.$$

2.2. Выбор коммутирующего элемента

При выборе тиратрона или тиристора руководствуются следующими данными: $U_{Л} = 2260 \text{ В}$, $I_1 = 15,2 \text{ А}$, $\tau = 2 \text{ мкс}$, $F = 400 \text{ Гц}$.

Выбираем тиристор IRKDL450. S25, имеющий $U_{\max} = 2500 \text{ В}$ и $I_{\max} = 460 \text{ А}$.

2.3. Расчет формирующего двухполюсника

В качестве двухполюсника выбираем искусственную длинную линию цепочечного типа. Число контуров линии

$$k \geq \frac{0,4}{\left(\frac{\tau_{\phi}}{\tau}\right)_{\text{расч}}} = \frac{0,4}{0,105} = 4,$$

где $\left(\frac{\tau_{\phi}}{\tau}\right)_{\text{расч}} = 0,7 \frac{\tau_{\phi}}{\tau} = 0,7 \cdot 0,15 = 0,105$.

Общая индуктивность линии

$$L_{Л} = \frac{\tau \cdot \rho_{Л}}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 75}{2} = 75 \text{ мкГн.}$$

Общая емкость линии

$$C_{Л} = \frac{\tau}{2 \cdot \rho_{Л}} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 75} = 0,013 \text{ мкФ.}$$

Емкость конденсаторов и индуктивности катушек каждой ячейки линии равны

$$L = \frac{L_{Л}}{k} = \frac{75}{4} = 18,8 \text{ мкГн,}$$

$$C = \frac{C_{Л}}{k} = \frac{0,013}{4} = 3,25 \cdot 10^{-9} \text{ Ф.}$$

2.4. Расчет зарядной цепи накопителя

Выбираем резонансный режим зарядной цепи, т.е. $\alpha = T/T_0 = 0,5$. Коэффициент повышения напряжения на линии при заряде

$$\gamma = 1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_0}} = 1 + e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 10}} = 1,86,$$

где Q_0 – добротность цепи заряда. Выбираем $Q_0 = 10$.

Напряжение источника питания

$$E_{П} = \frac{U_{Л}}{\gamma} = \frac{2660}{1,86} = 1430 \text{ В.}$$

Индуктивность зарядной цепи

$$L_3 = \frac{1}{4\pi^2 \cdot \omega^2 \cdot F^2 \cdot C_{Л}} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 0,5^2 \cdot 400^2 \cdot 13 \cdot 10^{-9}} = 48,8 \text{ Гн.}$$

Индуктивность зарядного дросселя принимаем

$$L_{зар} \approx L_3 = 48,8 \text{ Гн.}$$

Характеристическое сопротивление зарядной цепи

$$\rho_0 = \sqrt{\frac{L_3}{C_L}} = \sqrt{\frac{48,8}{13 \cdot 10^{-9}}} = 61,2 \text{ кОм.}$$

Максимальное значение зарядного тока

$$I_{\max} = \frac{E_{\Pi}}{\rho_0} = \frac{1430}{61,2 \cdot 10^3} = 23,4 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Среднее значение зарядного тока

$$I_{cp} = I_{\max} \frac{\gamma}{\pi} = 0,0234 \frac{1,86}{\pi} = 13,7 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Эффективное значение зарядного тока

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{23,4 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2}} = 16,6 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Мощность источника питания

$$P_{\Pi} = E_{\Pi} I_{cp} = 1430 \cdot 13,7 \cdot 10^{-3} = 19,6 \text{ Вт.}$$

Мощность, потребляемая линией в процессе заряда:

$$P_L = \frac{C_L U_L^2}{2} F = \frac{13 \cdot 10^{-9} \cdot 2660^2}{2} \cdot 400 = 18,4 \text{ Вт.}$$

КПД зарядной цепи

$$\eta_3 = \frac{P_L}{P_{\Pi}} = \frac{18,4}{19,6} = 0,939.$$

КПД модулятора

$$\eta = \frac{P_{cp}}{P_{\Pi}} = \frac{E \cdot I_{on} \cdot \tau_u \cdot F}{P_{\Pi}} = \frac{4,8 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 400}{19,6} = 0,78.$$

2.5. Требования к источнику питания (выпрямителю)

Напряжение выпрямителя $E_{\Pi} \geq 1430 \text{ В.}$

Мощность выпрямителя $P_{\Pi} \geq 19,6 \text{ Вт}$

После этого выбираем и рассчитываем схему выпрямителя.

2.6. Выбор зарядного диода ($D_{зар}$)

Требования к зарядному диоду:

Максимальный ток диода $I_{\max} = 23,4 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$

Средний ток диода $I_{cp} = 13,7 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$

Обратное напряжение на диоде $U_{обр} \geq 2660 \text{ В.}$

Выбираем диод D1005Б, у которого $U_{обр} = 4000 \text{ В, } I_{пр \max} = 0,1 \text{ А.}$

2.7. Расчет согласующей цепи

В модуляторах, работающих на нагрузку магнетронного типа, параллельно первичной обмотке импульсного трансформатора включают согласующую цепочку R1C1 (рис. 8.3) с тем, чтобы во время фронта модулирующего импульса обеспечить необходимое сопротивление нагрузки для разряда накопительной линии.

$$R1 = \rho_L = 75 \text{ Ом,}$$

$$C1 = \frac{\tau_{\phi}}{3R1} = \frac{0,15 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 75} = 1333 \text{ пФ.}$$

Мощность, рассеиваемая на сопротивлении R1:

$$P_{R_1} = C_1 \cdot U_1^2 \cdot F = 1333 \cdot 10^{-12} \cdot (1260)^2 \cdot 400 = 0,85 \text{ Вт.}$$

На этом расчет модулятора окончен.

3. Упражнения и задачи

1. Каковы особенности импульсной работы передатчиков при большой скважности?

2. Изобразите структурную схему импульсного передатчика.

3. С какой целью в импульсных модуляторах используются накопители энергии?

4. Укажите основные типы импульсных модуляторов и сравните их свойства.

5. Определите среднюю мощность источника питания модулятора импульсной РЛС, если мощность излучения 1 МВт, КПД фидера 0,8, полный КПД магнетрона 0,5, длительность импульса 4 мкс, а частота следования импульсов 250 Гц.

6. Определите сопротивление нагрузки модулятора импульсного многорезонаторного клистрона, если средняя выходная мощность клистрона 16 кВт, электронный КПД клистрона 0,4, ускоряющее напряжение 250 кВ, скважность 200.

7. Определите емкость и рабочее напряжение накопительного конденсатора в схеме модулятора с частотным разрядом накопителя, если амплитуда импульса на нагрузке 25 кВ, допустимое снижение амплитуды на вершине импульса 200 В. Модулятор работает с переменной длительностью импульса (2...6) мкс, ток нагрузки 10 А.

8. Определите допустимую величину паразитной емкости модулятора с частичным разрядом накопителя, если напряжение на нагрузке 10 кВ, ток импульсной модуляторной лампы 15 А, длительность фронта импульса 50 нс. Нагрузка: а) магнетрон, б) триодный генератор. Что нужно сделать для уменьшения длительности фронта при заданной величине паразитной емкости?

9. От каких параметров схемы модулятора с частичным разрядом накопителя зависит длительность фронта и среза импульса напряжения на нагрузке?

10. На какой ток следует выбирать импульсную модуляторную лампу для обеспечения длительности фронта импульса 30 нс, если паразитная емкость модулятора равна 50 пФ, а номинальное напряжение магнетрона 15 кВ?

11. Чем определяется длительность среза импульса на нагрузке, если она зашунтирована индуктивностью?

12. Искусственная длинная линия заряжается от источника постоянного напряжения через индуктивность. Напряжение источника питания 5 кВ, емкость линии 0,04 мкФ, индуктивность зарядного дросселя 4 Гн, активное сопротивление цепи заряда 500 Ом. Определите КПД цепи заряда и максимальное напряжение на линии.

13. Почему в модуляторе с полным зарядом накопителя не применяется заряд линии через активное сопротивление?

14. Определите максимальную частоту следования импульсов, максимальное напряжение на ИДЛ и КПД цепи заряда модулятора с полным зарядом накопителя, если напряжение источника питания 10 кВ, зарядная индуктивность 16 Гн, сопротивление потерь зарядной цепи 500 Ом, емкость одной ячейки ИДЛ 20 пФ, а число ячеек в линии 4.

15. Определите напряжение питания модулятора с ИДЛ, если сопротивление нагрузки модулятора 900 Ом, волновое сопротивление ИДЛ 35 Ом, напряжение на нагрузке 40 кВ, добротность цепи заряда 20.

16. Определите наименьший коэффициент трансформации выходного трансформатора модулятора с ИДЛ, волновое сопротивление линии и максимальное напряжение на линии, если максимальное напряжение на аноде тиратрона 16 кВ, напряжение на нагрузке 28 кВ, а ток нагрузки 35 А.

17. Как изменятся параметры выходного импульса модулятора с частичным разрядом накопителя, если: уменьшить или увеличить накопительную емкость; зарядное сопротивление; длительность и частоту следования запускающих импульсов; паразитную емкость; шунтирующую нагрузку; сопротивление нагрузки?

18. Определите мощность потерь на аноде модуляторной лампы, если ток лампы во время импульса 40 А, длительность импульса 1,5 мкс, частота следования импульсов 500 Гц. Напряжение на накопительной емкости 28 кВ, а на нагрузке 26,5 кВ.

19. Определите длительность спада импульса напряжения на магнетроне в резистивном модуляторе, если зарядное и зарядно-разрядное сопротивление равны $R_1 = R_2 = 20$ кОм, а $C_{II} = 80$ пФ.

20. Для получения импульса напряжения длительностью 50 нс использован отрезок коаксиального кабеля со сплошной изоляцией. Определить длину кабеля, если относительная диэлектрическая проницаемость изоляции равна:

а) 2,3 ; б) 4.

21. Модулятор с цепочечной длинной линией обеспечивает длительность 5 мкс. Определите суммарные емкость и индуктивность линии, если ее волновое сопротивление равно 75 Ом.

22. Если длительность импульса 1 мкс, частота следования импульсов 50 кГц и используется импульсный триод ГС-14 с номинальной выходной мощностью в непрерывном режиме 2 Вт, то какую мощность он может обеспечить в импульсном режиме?

23. Оцените величину емкости накопительного конденсатора модулятора, если ток нагрузки 15 А, допустимое снижение напряжения 100 В, длительность импульсов: а) 0,8 мкс; б) 2,5 мкс.

24. Оцените изменение длительности фронта модулирующего импульса при паразитной емкости модулятора 200 пФ, если напряжение на магнетроне 50 кВ, а ток коммутирующей лампы увеличен с 20 А до 30 А.

25. Определите длительность спада импульса в резистивном модуляторе (рис. 8.1), если $R_1 = R_2 = 10$ кОм; $C_{II} = 200$ пФ; сопротивление нагрузки мо-

дулятора постоянному току 450 Ом; нагрузка: а) линейная; б) слабо – нелинейная; в) резко–нелинейная.

Литература

1. Радиопередающие устройства / В. В. Шахгильдян, В. Б. Козырев, А. А. Ляховкин и др.; Под ред. В. В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.

2. Устройства генерирования и формирования радиосигналов / Л. А. Белов, В. М. Богачев, М. В. Благовещенский и др.; Под ред. Г. М. Уткина, В. Н. Кулешова и М. В. Благовещенского. – М.: Радио и связь, 1994. – 416 с.

3. Проектирование радиопередатчиков / В. В. Шахгильдян, М. С. Шутинин, В. Б. Козырев и др.; Под ред. В. В. Шахгильдяна. – М.: Радио и связь, 2000. – 656 с.

4. Шумилин М. С., Козырев В. Б., Власов В. А. Проектирование транзисторных каскадов передатчиков. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.

5. Петров Б. Е., Романюк В. А. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах. Учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 232 с.

6. Проектирование радиопередающих устройств СВЧ / Под ред. Г. М. Уткина. – М.: Сов. радио, 1979. – 320 с.

7. Проектирование и техническая эксплуатация радиопередающих устройств / М. А. Сиверс, Г. А. Зейтленок, Ю. Б. Несвижский и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 368 с.

8. Розов В. М. Радиовещательные однополосные передатчики. – М.: МТУСИ, 1992. – 60 с.

9. Городецкий С. Э. Радиопередающие устройства магистральной радиосвязи. – М.: Связь, 1980. – 176 с.

10. Зарубежные радиопередающие устройства / В. А. Антипенко, О. В. Воробьев, А. И. Лебедев–Карманов и др.; Под ред. Г. А. Зейтленка и А. Е. Рыжкова. – М.: Радио и связь, 1989. – 136 с.

11. Системы спутниковой связи / А. М. Бонч–Бруевич, В. Л. Быков, Л. Я. Кантор и др.; Под ред. Л. Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1992. – 224 с.

12. Багларов И. А., Ефимов А. П., Никонов А. В. Стереофоническое вещание. – М.: Радио и связь, 1993. – 240 с.

13. Рыжков А. В., Попов В. Н. Синтезаторы частот в технике радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

14. Шахмаев М. М. Однополосная угловая модуляция в радиосвязи. – Изд-во Казанск. ун–та, 1991. – 150 с.

15. Лапицкий Е. Г., Семенов Л. М., Сосновкин Л. Н. Расчет диапазонных радиопередатчиков. – М.: Энергия, 1974. – 272 с.

16. Верзунов М. В. Однополосная модуляция в радиосвязи. – М.: Воениздат, 1972. – 296 с.

17. Минаев М. И. Радиопередающие устройства СВЧ. – Мн. : Выш. шк., 1978. – 224 с.
18. Расчет элементов импульсных передающих устройств / Под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Сов. радио, 1971.
19. Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н. Цифровая обработка сигналов. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.
20. Каганов В. И. СВЧ-полупроводниковые радиопередатчики. – М.: Радио и связь, 1981. – 400 с.
21. Гоноровский И. С., Демин М. П. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Радио и связь, 1994. – 480 с.
22. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высш. шк., 2000. – 462 с.
23. Верещагин Е.М. Транзисторно–варакторные генераторы / Под ред. Ю.Г. Никитенко. – Киев: Техника, 1979. – 175 с.
24. Справочник конструктора РЭА / Под ред. Р.Г. Варламова. – М.: Сов. радио, 1980. – 480 с.
25. Пьезоэлектрические резонаторы: Справочник / В.Г. Андросова, Е.Г. Бронников, А.М. Васильев и др.; Под ред. П.Е. Кандыбы и П.Г. Позднякова. – М.: Радио и связь, 1992. – 392 с.
26. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности / А.А. Зайцев, А.И. Миркин, В.В. Мокряков и др.; Под ред. А.В. Голомеева. – М.: Радио и связь, 1989. – 640 с.
27. Кацнельсон Б.В., Калугин А.М., Ларионов А.С. Электровакуумные электронные и ионные приборы: Справочник / Под ред. А.С. Ларионова. – М.: Энергия, 1985. – 920 с.
28. Регламент радиосвязи. Международный Союз электросвязи. – М.: Радио и связь, 1985. – 510 с.
29. Общесоюзные нормы на допустимые отклонения частоты радиопередатчиков всех категорий и назначений. – М.: Воениздат, 1985. – 24 с.
30. Общесоюзные нормы на уровни побочных излучений радиопередающих устройств гражданского назначения. – М.: Воениздат, 1986. – 46 с.
31. Общесоюзные нормы на ширину полосы и внеполосные излучения радиочастот радиопередатчиков гражданского назначения. – М.: Воениздат, 1987. – 55 с.
32. ГОСТ 11515–91. Каналы и тракты звукового вещания. Основные параметры качества. Методы измерений.
33. ГОСТ 13924–80. Передатчики радиовещательные стационарные. Основные параметры, технические требования и методы измерений.
34. ГОСТ 18633–80. Система стереофонического радиовещания. Основные параметры.
35. ГОСТ 7845–79. Система вещательного телевидения. Основные параметры. Методы измерений.
36. ГОСТ 20532–83. Радиопередатчики телевизионные I–V диапазонов. Основные параметры, технические требования и методы измерений.

37. ГОСТ 13420–79. Передатчики для магистральной радиосвязи. Основные параметры, технические требования.
38. ГОСТ 22579–86. Радиостанции с однополосной модуляцией сухопутной подвижной службы. Типы, основные параметры и методы измерений.
39. ГОСТ 12252–86. Радиостанции с угловой модуляцией сухопутной подвижной службы. Типы, основные параметры, технические требования и методы измерений.
40. ГОСТ 26169–84. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Нормы коэффициентов комбинационных составляющих биполярных мощных высокочастотных линейных транзисторов.
41. ГОСТ 27002–89. Надежность в технике. Термины и определения.
42. Каплан А.Е., Кравцов Ю.А., Рылов В.А. Параметрические генераторы и делители частоты. – М.: Сов. радио, 1966. – 334 с.
43. Стандарт предприятия. Учебно–методическая, научно–исследовательская, редакционно–издательская документация, студенческие работы. Правила оформления текстовых документов СТП–12–01–78. Правила оформления графических материалов СТП–12–02–79. Курсовые проекты СТП–12–38–89.
44. ГОСТ 2.708–81. Обозначения буквенно–цифровые в электрических схемах.
45. ГОСТ 2.109–75. Правила выполнения электрических схем.
46. ГОСТ 2.721–74, ГОСТ 2.728–74, ГОСТ 2.755–74. Обозначения условные графические в схемах.
47. ГОСТ 2.109–73. Основные требования к чертежам.
48. ГОСТ 2.301–68, ГОСТ 2.304–68. Общие правила выполнения чертежей.
49. ГОСТ 2.708–81. Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники.

Приложения

Приложение 1

Типовой календарный план выполнения курсового проекта

Наименование этапа работы	Срок выполнения, недели	Объём выполнения, %
Составление индивидуального плана. Анализ задания. Составление и расчёт структурной схемы передатчика	4	25
Электрический расчёт не менее трёх каскадов высокочастотного тракта. Составление принципиальной электрической схемы.	7	40
Конструктивный расчёт. Оформление пояснительной записки	9	15
Сдача пояснительной записки на проверку преподавателю	10	
Оформление графического материала	12	15
Устранение замечаний в соответствии с рецензией преподавателя. Защита проекта	12–14	5

Приложение 2

Пример содержания пояснительной записки

1. Введение.....	4
2. Выбор и обоснование технических требований.....	5
3. Разработка структурной схемы радиопередатчика.....	7
4. Расчёт выходного каскада.....	9
4.1. Исходные данные.....	9
4.2. Выбор схемы.....	9
4.3. Расчёт электронного режима.....	10
4.4. Электрический расчёт колебательной системы.....	12
5. Расчёт задающего генератора.....	14
5.1. Исходные данные.....	14
5.2. Выбор схемы.....	14

5.3. Расчёт электронного режима.....	15
5.4. Электрический расчёт колебательной системы.....	17
6. Расчёт модулятора.....	18
6.1. Исходные данные.....	18
6.2. Выбор схемы модулятора.....	18
6.3. Расчёт электронного режима.....	19
6.4. Электрический расчёт элементов схемы.....	23
7. Вопросы машинного расчёта.....	25
8. Разработка схемы контроля, защиты и управления.....	29
9. Расчёт промышленного КПД.....	34
10. Расчёт и разработка конструкции передатчика.....	36
Заключение.....	39
Литература.....	41
Приложения.....	42
1. Спецификация к электрической схеме.....	42
2. Распечатка программ расчёта на ЭВМ.....	45

Приложение 3

Пример оформления пояснительной записки

6. Расчёт частотного модулятора

6.1. Исходные данные

Частота автогенератора $f_0 = 50$ МГц.

Девияция частоты $\Delta f_d = 10$ кГц.

Диапазон модулирующих частот 300 – 5000 Гц.

Допустимый коэффициент нелинейных искажений $K_n = 5$ %.

Глубина паразитной амплитудной модуляции не более 1 %.

Добротность контура автогенератора 150 и т.д.

6.2. Выбор схемы модулятора

В качестве управляющего элемента используем варикап. По сравнению с транзистором варикап имеет большую добротность и стабильность. Выбираем емкостную связь варикапа с контуром автогенератора (рис. 6.1). Эта схема конструктивно проще и обеспечивает меньшие нелинейные искажения [3].

6.3. Расчёт электронного режима

6.3.1. По справочнику [42] выбираем варикап с рабочей частотой порядка 50 МГц и достаточно большой ёмкостью перехода. Наиболее подходящим является варикап 2В102Е с параметрами [42]:

ёмкость перехода при напряжении 4 В 25– 37 пФ;

добротность на частоте 50 МГц 100;

максимальное обратное напряжение 45 В;

максимальная мощность 90 мВт и другие параметры, необходимые для расчёта.

6.3.2. Определяем необходимые отношения $p^2 C_{MO}/C_K$ [7]:

$$p^2 C_{MO}/C_K > = \psi_2 \Delta f_D / K_{H2} f_0 = 0,9 * 10 * 10^3 / 0,05 * 50 * 10^6 = 4 * 10^{-3}, \quad (6.1)$$

где p – коэффициент включения;

C_{MO} – ёмкость варикапа в рабочей точке;

ψ_2 – числовой коэффициент для выбранной схемы, равный 0,9 [3];

K_{H2} – коэффициент нелинейных искажений по второй гармонике,

$K_{H2} > K_{H2}$ и т.д.

Пример оформления задания

БГУИР

(Наименование высшего учебного заведения)

Факультет радиотехники и электроники

«УТВЕРЖДАЮ»

Зав. кафедрой _____

Подпись

« ____ » _____ 200 г.

ЗАДАНИЕ

по курсовому проектированию

студенту (Фамилия, инициалы)

1. Тема проекта Наименование типа передатчика

2. Сроки сдачи студентом законченного проекта

3. Исходные данные к проекту

3.1. Выходная мощность

3.2. Диапазон частот

3.3. Нестабильность частоты

3.4. Искажение сигнала

3.5. Параметры сигнала

3.6. Допустимое значение на гармониках

3.7. Параметры выходного тракта

4. Содержание расчётно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

4.1. Выбор и обоснование технических требований и структурной схемы радиопередатчика

4.2. Выбор, обоснование и энергетический расчёт принципиальной схемы

4.3. Разработка конструкции, конструктивный чертёж

4.4. Разработка схемы контроля, защиты и управления передатчиком

4.5. Расчёт КПД передатчика

Заключение

Список литературы

5. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей и графиков)

5.1. Принципиальная схема передатчика 1–2 листа

5.2. Чертёж разработанной конструкции, узла или передатчика 1–2 листа

6. Консультант по проекту (с указанием относящихся к ним разделов проекта)

Электрическая часть курсового проекта – руководитель проекта

Конструктивная часть – руководитель проекта

7. Дата выдачи задания

8. Календарный график работы над проектом на весь период проектирования (с указанием сроков выполнения и трудоёмкости отдельных этапов)

Заполнить раздел 8 в соответствии с типовым календарным планом и замечаниями руководителя проекта

Руководитель _____ /Фамилия, инициалы/
(подпись)

Задание принял к исполнению _____ /Фамилия, инициалы/
(Дата и подпись студента)

Библиотека БГУИР

СОДЕРЖАНИЕ

КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОПЕРЕДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ.

ВВЕДЕНИЕ.....	
ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ.....	
Практическое занятие № 1. Структурные схемы радиопередатчиков.....	
Практическое занятие № 2. Электронные режимы генераторов с внешним возбуждением (ГВВ).....	
Практическое занятие № 3. Цепи согласования ГВВ.....	
Практическое занятие № 4. Схемотехника ГВВ.....	
Практическое занятие № 5. Генераторы с самовозбуждением (автогенераторы).....	
Практическое занятие № 6. Частотные модуляторы.....	
Практическое занятие № 7. Цифровые модуляторы.....	
Практическое занятие № 8. Импульсные модуляторы.....	
Литература.....	
<i>Приложения</i>	
Приложение 1. Типовой календарный план выполнения курсового проекта...	
Приложение 2. Пример содержания пояснительной записки.....	
Приложение 3. Пример оформления пояснительной записки.....	
Приложение 4. Пример оформления задания.....	

Учебное издание

**Бригидин Анатолий Михайлович,
Ползунов Владимир Васильевич**

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Учебно-методическое пособие
по курсовому проектированию и практическим занятиям
для студентов специальностей «Радиотехника», «Радиоэлектронные системы»,
«Системы радиосвязи, радиовещания и телевидения», «Радиоинформатика»,
«Радиоэлектронная защита информации» всех форм обучения

Редактор Т.П. Андрейченко

Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 24.11.05.
ная.

Формат 60x84 1/16.

Бумага офсет-

Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 5,8.

Печать ризографическая.
Тираж 150 экз.

Усл. печ. л. 6,28.
Заказ 53.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0131518 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6