

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

М.В. РОДИН, А.Н. СЕМЕНОВ, П.М. ХИЖНЯКОВ

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
ПО РАДИОПЕРЕДАЮЩИМ УСТРОЙСТВАМ**

Учебно-методическое пособие

**Москва
Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана
2022**

УДК 621.37
ББК 32.848
Р

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://bmstu.press/catalog/item/>

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника»
Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»

*Рекомендовано Научно-методическим советом
МГТУ им. Н. Э. Баумана в качестве учебно-методического пособия*

Рецензент

Доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные приборы»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н., доцент *Пясецкий В.Б.*

Родин, М.В.

Лабораторный практикум по радиопередающим устройствам: учебно-методическое пособие / М.В. Родин, А.Н. Семенов, П.М. Хижняков. – М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2022. – 112 с.: ил.

ISBN

Содержит методические указания к выполнению лабораторного практикума по курсу «Устройства генерирования и формирования сигналов». Шесть лабораторных работ охватывают основные разделы курса: радиочастотные усилители мощности и автогенераторы, а также амплитудные, частотные и импульсные модуляторы.

В описании каждой лабораторной работы приведены краткие теоретические сведения, необходимые для ее выполнения, состав лабораторного стенда, методика экспериментального исследования, требования к оформлению отчета и контрольные вопросы и задания для подготовки к защите.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплину «Устройства генерирования и формирования сигналов».

УДК 621.37
ББК 32.848

Оглавление

Предисловие	4
Правила техники безопасности	8
Лабораторная работа №1. Исследование радиочастотного транзисторного усилителя мощности	10
Лабораторная работа №2. Исследование радиочастотного усилителя мощности с амплитудным модулятором	30
Лабораторная работа №3. Исследование радиочастотного усилителя мощности с импульсным модулятором	48
Лабораторная работа №4. Исследование автогенератора с частотным модулятором	61
Лабораторная работа №5. Исследование автогенератора с кварцевой стабилизацией	77
Лабораторная работа №6. Исследование радиочастотного усилителя мощности сигналов с цифровой амплитудно-фазовой модуляцией	93
Литература.....	110

Предисловие

Лабораторные работы являются важной составляющей учебного процесса при изучении дисциплины «Устройства генерирования и формирования сигналов» в рамках освоения образовательной программы специалитета по направлению подготовки 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

Лабораторный практикум – это наиболее эффективная форма практико-ориентированного обучения, способствующая освоению студентами образовательной программы и формированию у них комплекса общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций путем выполнения реальных практических задач.

Целями лабораторного практикума являются:

1. Формирование практических умений и навыков экспериментального исследования характеристик основных функциональных частей радиопередающих устройств.

2. Изучение современной элементной базы, применяемой при построении радиопередающих устройств, ее конструктивного исполнения и технических характеристик.

3. Освоение современных методов экспериментальных исследований при максимальном их приближении к процессу технического контроля и наладки реальной аппаратуры.

4. Формирование практических навыков работы с контрольно-измерительным оборудованием и технической документацией.

5. Формирование навыков анализа и обобщения полученных экспериментальных результатов, в том числе их сравнения с теоретическими расчетами и оценки расхождений между ними, а также оформления полученных результатов.

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с рабочей программой дисциплины «Устройства генерирования и формирования

сигналов», которая входит в основную образовательную программу высшего образования – программу специалитета по направлению подготовки 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы», и предназначено для методического сопровождения проведения лабораторных работ.

Все лабораторные работы содержат контрольные вопросы и задания, позволяющие самостоятельно проработать представленный в пособии материал и подготовиться к выполнению и защите лабораторных работ.

При выполнении каждой лабораторной работы одним из заданий является компьютерное моделирование лабораторного макета (или его составных узлов) в программах Micro-Cap и/или Matlab Simulink. Это задание позволяет оценить владение студентом навыком компьютерного моделирования радиопередающих устройств.

Лабораторный практикум выполняется группами студентов (в группе от четырех до шести студентов) на лабораторном стенде с использованием контрольно-измерительного оборудования.

В приведенных лабораторных работах студентам необходимо выполнить экспериментальные исследования радиочастотных усилителей мощности, автогенератора, а также амплитудного, частотного и импульсного модуляторов.

Процесс проведения лабораторных работ включает в себя подготовительную (теоретическую), экспериментальную и заключительную части.

Подготовительная (теоретическая) часть содержит теоретический материал, позволяющий ознакомиться с устройством, назначением, правилами включения лабораторного макета, техникой безопасности при работе на лабораторном стенде, уяснить цель работы и методику проведения эксперимента, а также (при необходимости) выполнить предусмотренные описанием работы предварительные расчеты.

К подготовительной части относится также обязательная самостоятельная проработка студентами материалов, приведенных в списке литературы.

Перед выполнением работы каждый студент обязан представить преподавателю (лаборанту) отчет, содержащий необходимые расчеты, а также структурные и принципиальные схемы исследуемого макета. Если представленный материал оценен преподавателем (лаборантом) удовлетворительно, то студент получает контрольные вопросы по теме лабораторной работы. При удовлетворительных ответах на контрольные вопросы студент допускается к выполнению работы. Если материалы, представленные студентом, или его ответы на вопросы признаны преподавателем (лаборантом) неудовлетворительными, студент к работе не допускается.

Экспериментальная часть является основным структурным элементом лабораторной работы.

В ходе экспериментальной части студенты самостоятельно выполняют задания, предусмотренные в лабораторной работе, и подготавливают данные для составления отчета.

При проведении эксперимента преподаватель (лаборант) дает дополнительные разъяснения, отвечает на вопросы студентов, ставит индивидуальные задачи. Работа считается законченной после утверждения полученных результатов преподавателем (лаборантом).

Заключительная часть лабораторной работы включает в себя:

- анализ результатов эксперимента с применением методики обработки;
- формулировку выводов по результатам выполнения заданий;
- самоконтроль результатов выполнения заданий;
- представление отчета и защиту работы.

Отчет оформляется для каждой лабораторной работы в соответствии с требованиями, изложенными в настоящем пособии. Студенты получают зачет после представления оформленного отчета и защиты лабораторной работы.

Для получения зачета по итогам защиты необходимо аккуратно и грамотно оформить отчет в соответствии с предъявляемыми требованиями, сформулировать обоснованные выводы по работе, а также правильно

(или с незначительными неточностями) ответить на вопросы преподавателя (лаборанта).

Отметка о наличии зачета проставляется в журнал лабораторных работ.

Защита лабораторной работы учитывается как показатель текущей успеваемости студентов.

После выполнения лабораторного практикума студенты смогут:

- подтвердить в реальных условиях и расширить теоретические знания, получаемые на лекциях и в процессе самостоятельного изучения рекомендованной литературы;

- выбрать элементную базу для проектирования радиопередающих устройств;

- провести компьютерное моделирование основных узлов радиопередающих устройств;

- снять основные характеристики узлов радиопередающих устройств с помощью измерительного оборудования;

- объединить результаты, полученные подгруппой студентов, и проводить их обработку.

Лабораторный практикум также позволит повысить познавательную активность студентов и сформирует у них практические навыки работы в коллективе.

Правила техники безопасности

Несчастные случаи во время проведения лабораторных работ происходят чаще всего из-за несоблюдения правил техники безопасности. Поэтому студенты допускаются к лабораторным занятиям только после инструктажа по этим правилам, о чем должны свидетельствовать их личные подписи в специальном журнале. Необходимо иметь в виду, что неаккуратность, невнимательность, спешка и недостаточная подготовка к выполнению лабораторной работы могут повлечь за собой несчастный случай.

Лица, не выполняющие правила техники безопасности или допустившие их нарушение, отстраняются от выполнения работ и привлекаются к ответственности. От студентов, работающих в лаборатории, требуется не нарушать самим и останавливать всех лиц, не выполняющих правила техники безопасности.

Следует помнить, что опасно все оборудование, находящееся под напряжением, причем напряжение выше 36 В является основным источником всех несчастных случаев со смертельным исходом. Если произошел несчастный случай, замечены неисправности или нарушения правил техники безопасности, то необходимо немедленно оказать помощь пострадавшему и сообщить об этом преподавателю (лаборанту).

При выполнении лабораторных работ строго воспрещается:

1. Касаться руками проводников и незащищенных частей лабораторного стенда.
2. Подавать электропитание на лабораторный стенд без предварительной проверки и разрешения преподавателя (лаборанта).
3. Оставлять без наблюдения лабораторный стенд, находящийся под напряжением.
4. Снимать или перевешивать предупреждающие и запрещающие плакаты.

5. Загромождать рабочее место одеждой, книгами и другими вещами, не относящимися к выполняемой работе.

Лабораторные работы без преподавателя (лаборанта) выполнять запрещено.

Если произошел несчастный случай, то необходимо немедленно:

- отключить электропитание лабораторного стенда;
- сообщить преподавателю (лаборанту);
- оказать по возможности первую помощь пострадавшему;
- вызвать скорую помощь по телефону 101 или 112.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

Исследование радиочастотного транзисторного усилителя мощности

Цель работы – экспериментальная проверка принципов функционирования и практическое освоение методов исследования характеристик и режимов работы радиочастотного транзисторного усилителя мощности.

Задачи работы – изучение приемов работы с контрольно-измерительным оборудованием, а также измерение с его помощью напряжений и токов в различных точках схемы и получение основных характеристик радиочастотного усилителя мощности в разных режимах работы.

Краткие теоретические сведения

В подавляющем большинстве радиоэлектронных комплексов неотъемлемой составной частью радиопередающего устройства (РПДУ) является *генератор с внешним возбуждением*. Он предназначен для преобразования энергии постоянного тока источника электропитания (ИЭП) в энергию выходных колебаний с частотой, равной или кратной частоте менее мощных входных (управляющих) колебаний. В современной научно-технической литературе, когда частота входного и выходного колебаний, а также их форма совпадают, генератор с внешним возбуждением называют *усилителем мощности* (УМ).

Функциональная схема УМ приведена на рис. 1.1.

Основу УМ составляет активный *усилительный прибор* (электровакуумный или полупроводниковый), управляемый входным сигналом $u_{вх}(t)$. Как правило, это сигнал, подлежащий усилению по мощности (например, с выхода возбудителя или менее мощного предварительного УМ).

Нагрузка УМ может быть как резонансной, так и апериодической. В качестве нагрузки Z_n (в общем случае – комплексной) может выступать

другой усилительный каскад или антенно-фидерное устройство.

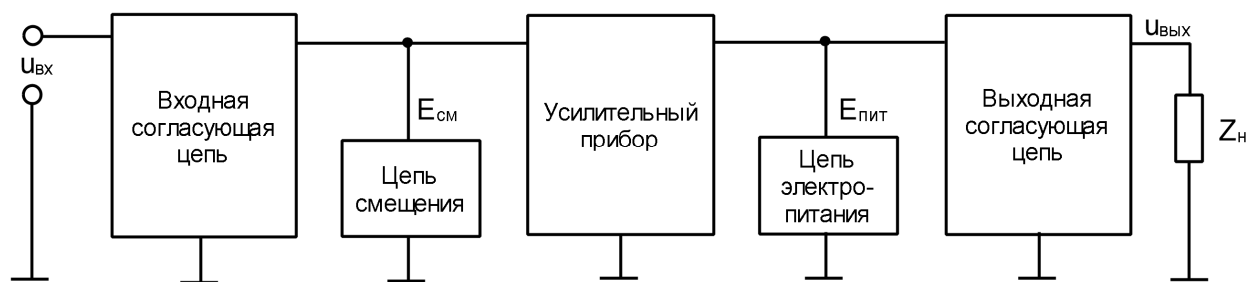


Рис. 1.1. Функциональная схема УМ

Цепь электропитания содержит источник постоянного напряжения $E_{пит}$ и блокировочные элементы (конденсаторы и катушки индуктивности), разделяющие цепи постоянного и переменного токов. Она предназначена для создания постоянного тока, протекающего через усилительный прибор.

Цепь смещения состоит из источника постоянного напряжения $E_{см}$ и блокировочных элементов. Она необходима для задания требуемого режима работы усилительного прибора.

Входная согласующая цепь необходима для трансформирования входного сопротивления усилительного прибора на рабочей частоте в сопротивление, равное выходному сопротивлению источника входного сигнала для уменьшения отражений и потерь мощности. В свою очередь, *выходная согласующая цепь* служит для трансформирования сопротивления нагрузки Z_n на рабочей частоте в выходное сопротивление усилительного прибора.

Кроме того, в состав УМ могут входить цепи фильтрации, коррекции, антипаразитные цепи, препятствующие возбуждению паразитных колебаний, элементы защиты усилительного прибора от перегрузок и другие (на рис. 1.1 не показаны).

УМ в большинстве РПДУ являются выходными каскадами. На долю этих каскадов обычно приходится большая часть мощности, потребляемой РПДУ от ИЭП. Поэтому основное требование, предъявляемое к УМ, – получение высокого коэффициента полезного действия (КПД) при обеспечении заданной мощности в нагрузке и качества выходного сигнала. Это накладывает определенные ограничения на выбор режима работы усилительного прибора

и параметров согласующих и фильтрующих цепей. В качестве усилительного прибора здесь и далее будем рассматривать полевой транзистор типа металл-оксид-полупроводник (МОП-транзистор).

Упрощенная схема исследуемого в работе транзисторного радиочастотного УМ с параллельными цепями электропитания и смещения приведена на рис. 1.2.

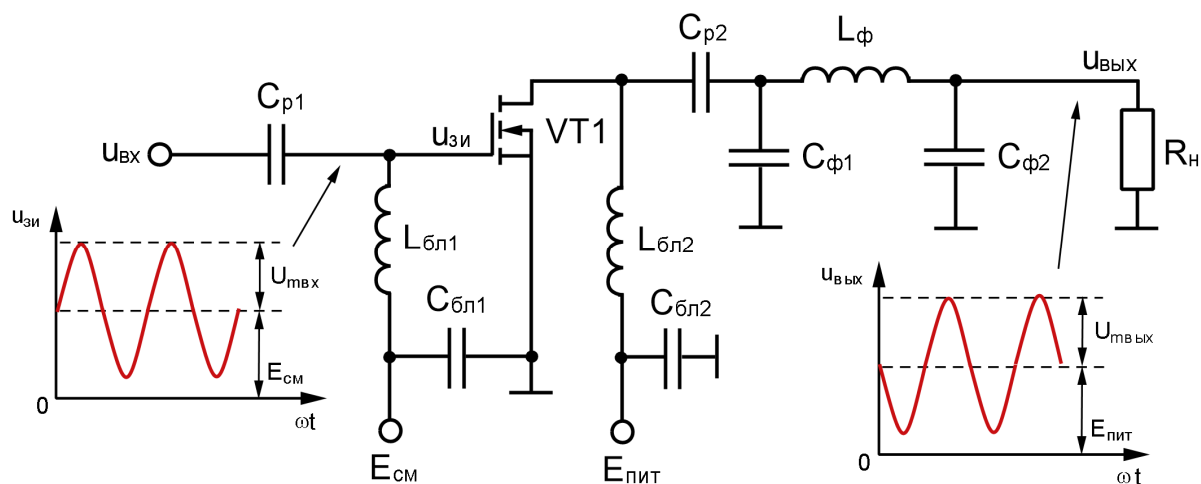


Рис. 1.2. Упрощенная схема транзисторного УМ

Входная цепь содержит разделительный конденсатор C_{p1} и цепь источника напряжения смещения $E_{см}$ (состоит из блокировочных элементов $L_{бл1}$, $C_{бл1}$, препятствующих замыканию переменной составляющей входного напряжения $u_{вх}(t)$ через источник $E_{см}$). Выходная цепь содержит разделительный конденсатор C_{p2} , цепь электропитания (состоит из блокировочных элементов $L_{бл2}$, $C_{бл2}$, препятствующих замыканию переменной составляющей выходного тока через источник $E_{пит}$) и согласующую цепь, представляющую собой фильтр нижних частот П-типа ($C_{ф1}$ - $L_{ф}$ - $C_{ф2}$). Разделительные конденсаторы C_{p1} и C_{p2} препятствуют протеканию постоянного в источник входного напряжения $u_{вх}(t)$ и нагрузку R_n .

В установившемся периодическом режиме напряжение на управляющем электроде транзистора $VT1$ (напряжение между затвором и истоком) описывается как

$$u_{зи}(\omega t) = E_{см} + u_{вх}(\omega t) = E_{см} + U_{mвх} \cos \omega t ,$$

где U_{mex} и ω – амплитуда гармонического входного напряжения $u_{ex}(t)$ и его круговая частота, а t – текущее время.

Форма протекающего через транзистор VTI тока (ток стока) определяется значением приложенного к затвору напряжения смещения E_{cm} , амплитудой входного напряжения U_{mex} и напряжением источника электропитания E_{num} .

Обычно выходная цепь УМ строится таким образом, что ее входное сопротивление на всех частотах, кроме рабочей, близко к нулю. Считая, что рабочей является первая гармоника входного сигнала, выходное напряжение транзистора будет иметь вид

$$u_{вых}(\omega t) = E_{num} - U_{mвых} \cos \omega t,$$

где $U_{mвых} = I_{c1} R_{экв}$ – амплитуда гармонического напряжения на выходе УМ; I_{c1} – амплитуда первой гармоники выходного тока транзистора; $R_{экв}$ – сопротивление, на которое нагружен транзистор.

Форма выходного тока транзистора характеризуется *углом отсечки*, под которым понимают половину времени (выраженного в электрических градусах от частоты входного сигнала) его протекания. Расчетное выражение для определения угла отсечки имеет вид:

$$\theta = \arccos \left(\frac{E_{cm} - U_{отс}}{U_{mex}} \right),$$

где $U_{отс}$ – напряжение отсечки транзистора.

Если угол отсечки $\theta = 180^\circ$, то выходной ток транзистора протекает в течение всего периода входного сигнала – и говорят, что транзистор работает в *режиме колебаний первого рода*, или в *классе А*. Иными словами, транзистор работает без отсечки выходного тока (находится в активном состоянии), т.е. не отключается от нагрузки, поэтому форма тока через нагрузку более или менее точно повторяет форму напряжения входного сигнала (рис. 1.3).

При угле отсечки $\theta < 180^\circ$ выходной ток транзистора протекает только часть периода входного сигнала. Такой режим является нелинейным – и его

называют *режимом колебаний второго рода*. В этом случае ток стока содержит, помимо первой, большое число высших гармоник.

Итак, в режиме колебаний второго рода выходной ток транзистора имеет форму импульсов. Здесь различают *класс В* (ток через транзистор протекает в течение полупериода напряжения входного сигнала) и *класс С* (ток протекает в течение времени меньшем полупериода). В классе *В* при усилении гармонических сигналов угол отсечки равен 90° . В классе *С* угол отсечки меньше 90° .

Класс АВ является промежуточным между классами *А* и *В*. Ток покоя УМ (то есть постоянная составляющая тока стока) в классе *АВ* существенно больше, чем в классе *В*, но существенно меньше, чем в классе *А*. Угол отсечки меньше 180° , но больше 90° , т.е. при усилении гармонических сигналов транзистор проводит ток в течение бо́льшей части периода входного сигнала.

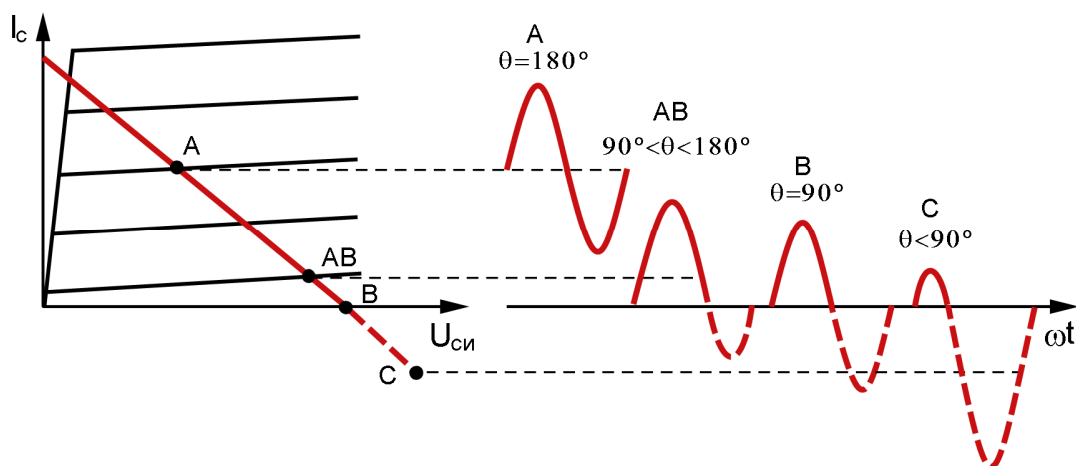


Рис. 1.3. Форма тока через транзистор для разных классов УМ

Для работы в классе *А* рабочая точка выбирается на линейном участке проходной характеристики транзистора (точка 1, рис. 1.4). В классе *В* точка находится ровно в том месте проходной характеристики, где происходит отсечка для пропускания только одной полуволны тока (точка 2). В классе *С* рабочая точка (точка 3) выбирается левее отсечки (т.е. при нулевом напряжении на входе транзистор заперт). Ток стока в этом случае представляет собой периодическую последовательность косинусоидальных импульсов

(если напряжение на входе УМ гармоническое), длительность и амплитуда которых зависят от напряжения смещения по отношению к напряжению отсечки.

Достоинствами режимов с отсечкой выходного тока являются хорошее использование транзистора по мощности и высокий КПД. Недостатками – обилие нерабочих гармоник и искажения при усилении слабых сигналов.

На практике выходные импульсы тока создают в нагрузке синусоидальное напряжение определенной частоты за счет резонансного контура или фильтра низкой частоты, подключенных к выходу УМ.

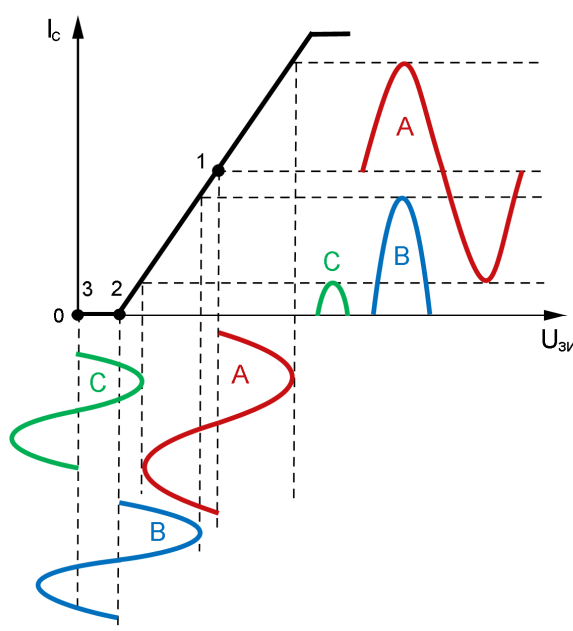


Рис. 1.4. Выбор рабочей точки для разных классов УМ

Форма выходного тока транзистора также характеризует *напряженность* режима работы УМ. Количественно степень напряженности оценивают коэффициентом использования напряжения электропитания:

$$\zeta = U_{\text{твых}} / E_{\text{пит}} .$$

Различают следующие режимы работы УМ по степени напряженности (рис. 1.5).

1. Недонапряженный режим ($\zeta = 0,7 \dots 0,9$), для которого характерна косинусоидальная форма импульса выходного тока (кривая 1) из-за слабого

влияния выходного напряжения усилительного транзистора на ток стока. В этом режиме в течение всего периода входного сигнала усилительный транзистор находится либо только в одном активном состоянии (без отсечки выходного тока, т.е. УМ работает в классе A), либо попеременно в двух – активном и отсечки (т.е. УМ работает в классах AB , B или C).

2. Граничный режим ($\zeta \approx 0,9$), характеризующийся уплощенной вершиной импульса выходного тока (кривая 2). В отличие от недонапряженного, в этом режиме усилительный транзистор только доходит до полностью открытого состояния (насыщения), но не находится в нем какое-либо конечное время. В этом случае по-прежнему возможна работа УМ во всех четырех классах.

3. Перенапряженный режим ($\zeta \geq 1$), для которого характерен провал на вершине импульса выходного тока (слабо перенапряженный режим, кривая 3) или раздвоение импульса (сильно перенапряженный режим, кривая 4) из-за сильного влияния выходного напряжения усилительного транзистора на ток стока. В отличие от граничного, в слабо перенапряженном режиме усилительный транзистор находится в течение некоторого времени в полностью открытом состоянии (насыщении). Наконец, в отличие от слабо перенапряженного, в сильно перенапряженном режиме транзистор находится в течение некоторого времени в инверсном состоянии. В перенапряженном режиме УМ не может работать в классе A .

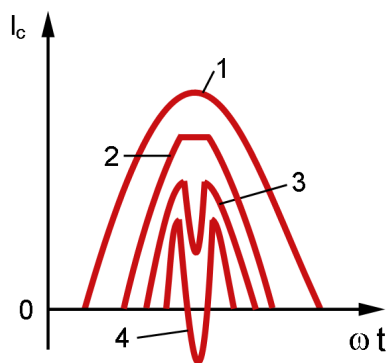


Рис. 1.5. Форма импульса тока для разных режимов работы УМ по степени напряженности

В настоящей лабораторной работе исследуется радиочастотный УМ с позиций определения оптимальных условий его работы – с максимальными значениями выходной мощности и КПД. Они могут быть достигнуты только за счет выбора того или иного значения угла отсечки (т.е. класса УМ), а также степени напряженности режима УМ.

Описание лабораторного стенда

Схема соединений лабораторного стенда приведена на рис. 1.6. Стенд включает в себя:

- лабораторный макет;
- блок питания Б5-47;
- осциллограф АКИП-4115/1А;
- вольтметр В7-38;
- анализатор спектра АКИП-4205/1;
- амперметр Д5099;
- генератор АКИП-3210.

Все перечисленные средства измерений, блок питания и генератор сигналов могут быть заменены другими, которые по своим функциональным возможностям, характеристикам и классу точности для соответствующих параметров не хуже указанных.

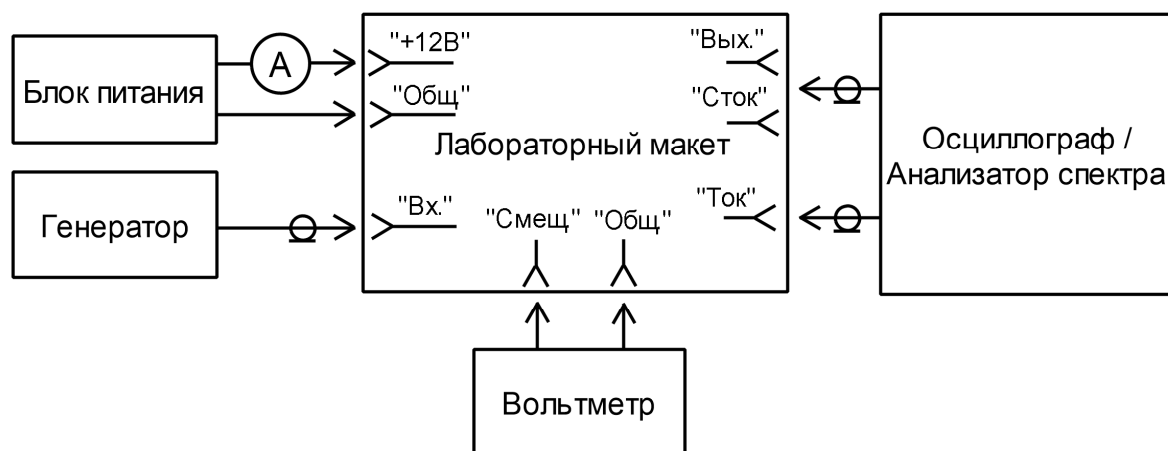


Рис. 1.6. Схема соединений лабораторного стенда

Лицевая панель лабораторного макета (рис. 1.7) содержит его упрощенную принципиальную схему, органы управления, индикации и гнезда для подключения средств измерения, генератора сигналов и блока питания.

В макете предусмотрена возможность дискретного изменения сопротивления нагрузки исследуемого УМ (переключатель «Сопротивление»), а также индуктивности выходной согласующей цепи (переключатель «Индуктивность»). Для регулировки напряжения смещения УМ предусмотрен переменный резистор «Смещ.».

Процесс настройки УМ контролируется при помощи осциллографа путем наблюдения форм выходного тока усилительного транзистора и напряжения в нагрузке.

Мощность, потребляемая УМ от блока питания, контролируется при помощи амперметра и вольтметра, встроенного в блок. Пределы регулировки выходного напряжения блока питания должны составлять 12 ± 3 В, максимальный ток – 1 А.

Принципиальная схема лабораторного макета приведена на рис. 1.8.

В основе макета – однокантный однокаскадный УМ, построенный по схеме с общим выходным электродом усилительного прибора. В качестве последнего используется МОП-транзистор *VTI* типа 2П769А. Электропитание входной и выходной цепей УМ – параллельное.

Блокировочная катушка индуктивности *L1*, включенная последовательно в цепь электропитания стока, препятствует закорачиванию через источник электропитания переменных составляющих тока стока, а конденсатор *C4* снимает с цепи электропитания остаточное переменное напряжение, возникающее за счет неидеальности катушки *L1*.

Конденсаторы *C1* и *C5* являются разделительными. Они препятствуют прохождению постоянного тока в источник входного сигнала, подключаемый к гнезду «Вх.», и нагрузку УМ.

Конденсаторы *C6*, *C7* и катушки индуктивности *L2-L5* составляют выходную фильтрующе-согласующую цепь на основе *П*-фильтра низких

частот. Он ослабляет паразитные высшие гармоники рабочей частоты. Для исследования работы согласующей цепи предусмотрена возможность дискретной коммутации катушек посредством переключателя *S1*.

Резисторы *R6* и *R7*, являясь делителем напряжения, задают смещение транзистора *VT1*. Переменный резистор *R6* позволяет регулировать напряжение смещения $E_{см}$ в достаточно широких пределах, обеспечивая возможность изменения угла отсечки исследуемого УМ. Значение напряжения смещения можно контролировать с помощью вольтметра, подключаемого к гнездам «Смещ.»-«Общ.».

В качестве нагрузки УМ используются резисторы *R9-R14*. Их коммутация осуществляется посредством переключателя *S3*. Для обеспечения контроля формы выходного напряжения УМ, а также его спектра служит гнездо «Вых.».

Для обеспечения контроля формы тока стока применен резистор *R8*. Форму напряжения на этом резисторе, совпадающую с формой тока стока, можно наблюдать на экране осциллографа, подключенного к гнезду «Ток». Форму переменного напряжения в стоковой цепи транзистора можно контролировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Сток».

Для защиты УМ от перенапряжения по цепи электропитания предусмотрен супрессор *VD1*. Как только напряжение электропитания превысит допустимое значение, ток через супрессор резко увеличится – и сработает самовосстанавливающийся предохранитель *FA1*, который отключит УМ от блока питания. Также отключение произойдет и в том случае, если ток потребления УМ по какой-то причине станет выше допустимого.

Цепь *R1-VD1-DA1-R2-R3-R4* обеспечивает индикацию наличия напряжения электропитания.

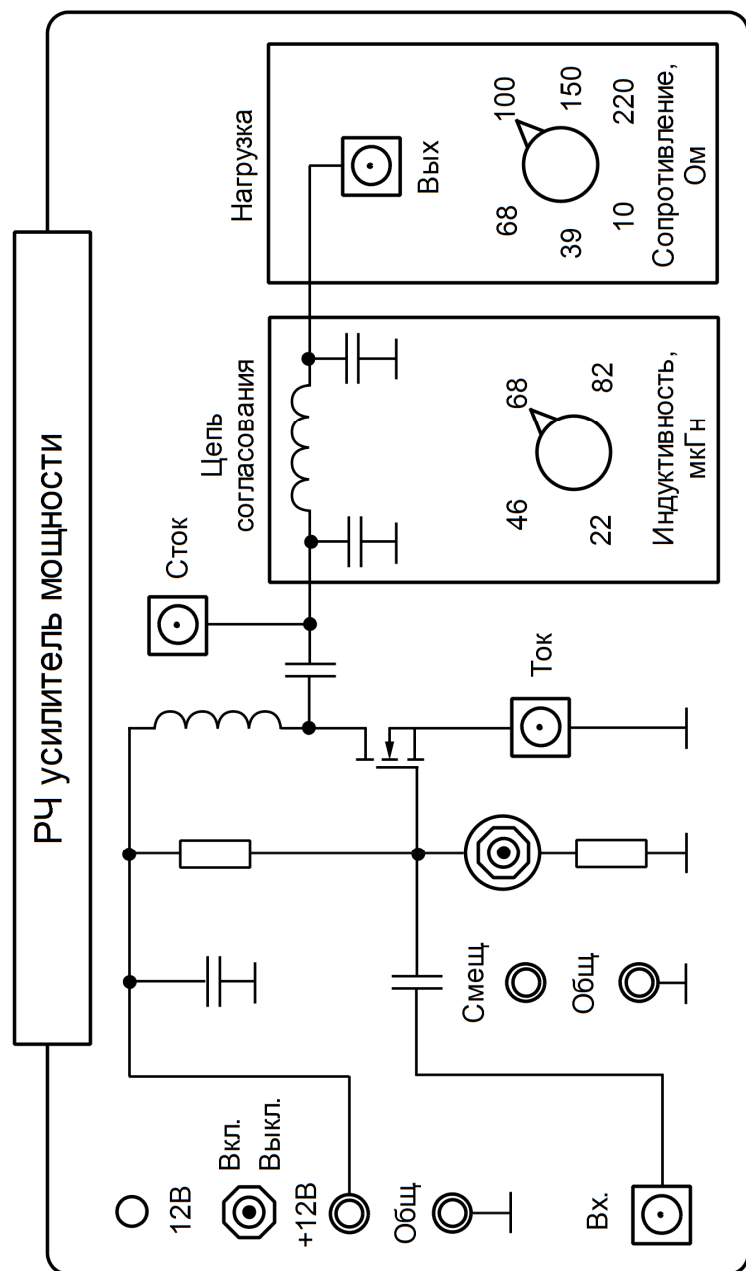


Рис. 1.7. Лицевая панель лабораторного макета

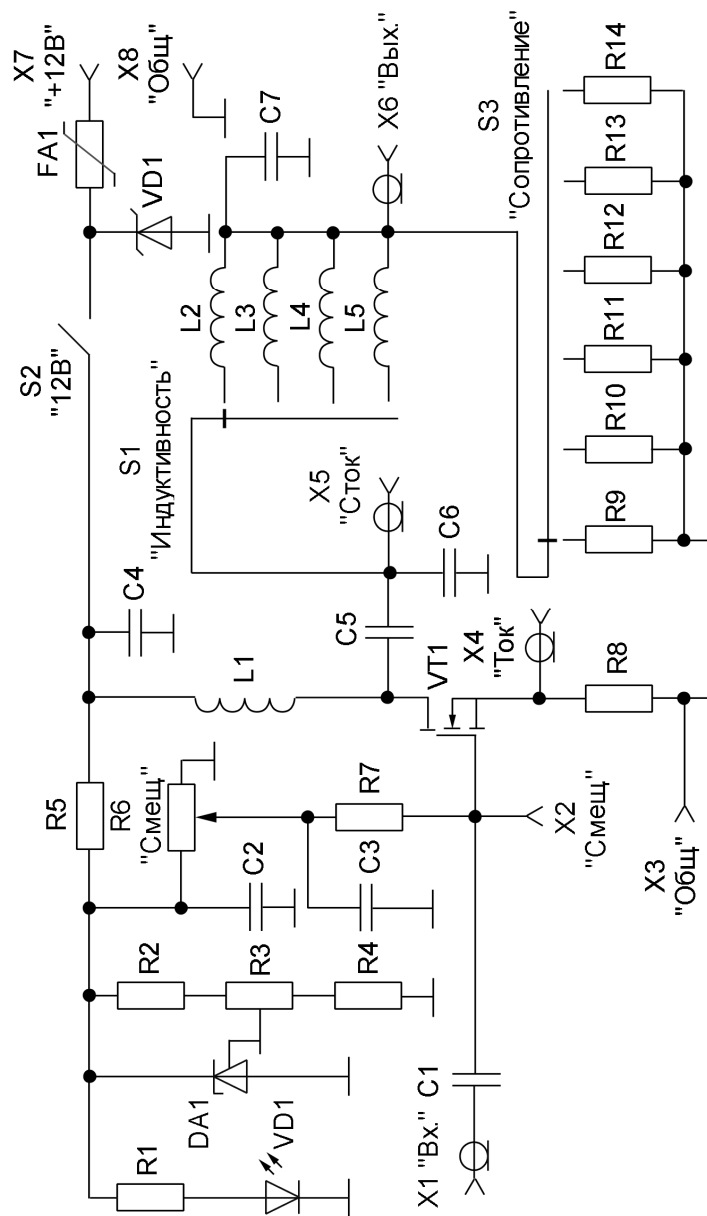


Рис. 1.8. Принципиальная схема лабораторного макета

Методика выполнения работы

Изучите теоретические сведения, приведенные в настоящих методических указаниях, по теме лабораторной работы. В случае наличия неясных моментов проконсультируйтесь у преподавателя (лаборанта).

Ознакомьтесь со схемами лабораторного стенда и макета, а также с размещением органов управления макетом. Изучите устройство и размещение органов настройки и регулировки измерительных приборов, генератора и блока питания.

ВАЖНО! Перед началом работы в лаборатории изучите правила техники безопасности!

Выполнение работы осуществляется в соответствии со следующей методикой.

1. Исследование классов работы УМ

1.1 Собрать лабораторный стенд в соответствии со схемой на рис. 1.6. Подключить к сети переменного тока 230 В 50 Гц измерительные приборы, генератор и блок питания.

1.2 Не включая электропитания, перевести переключатель «Индуктивность» на лицевой панели лабораторного макета в положение «47 мкГн», переключатель «Сопротивление» – в положение «100 Ом», а ручку переменного резистора «Смещ.» в крайнее левое положение. Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 0,1 В. Получить разрешение на включение макета у преподавателя (лаборанта).

1.3 Установить на блоке питания напряжение 12 В – и включить электропитание макета с помощью тумблера «12В» (положение «Вкл.»). При этом на лицевой панели макета загорится светодиодный индикатор.

1.4 Изменяя сопротивление переменного резистора «Смещ.» на лицевой панели макета, задать напряжение смещение $E_{см}$ для работы УМ

последовательно в классах A , AB , B , C . Амплитуду напряжения синусоидального сигнала на выходе генератора допускается менять от 0,1 В до 1 В. Напряжение смещения фиксировать с помощью вольтметра, подключенного к гнездам «Смещ.»-«Общ.», осциллограммы тока стока транзистора – с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Ток», а форму и амплитуду напряжения на нагрузке – с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.». Данные измерений занести в табл. 1.1.

ВАЖНО! Не допускать переход усилительного транзистора в состояние насыщения.

Для каждого класса работы УМ необходимо зафиксировать спектр выходного сигнала с помощью анализатора спектра, подключенного к гнезду «Вых.».

Экспериментально оценить угол отсечки для каждого класса работы УМ. Сравнить его с рассчитанным теоретически. Полученные результаты занести в табл. 1.1.

Табл. 1.1. Результаты исследования классов работы УМ

Класс	Напряжение смещения, $E_{см}$, В	Амплитуда напряжения входного сигнала, $U_{вх}$, В	Амплитуда напряжения на нагрузке, $U_{вых}$, В	Угол отсечки, град	Форма тока стока	Форма напряжения на нагрузке
A						
AB						
B						
C						

2. Исследование выходной фильтрующе-согласующей цепи

2.1 Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 1 В.

2.2 Изменяя сопротивление переменного резистора «Смещ.», задать напряжение смещения для работы УМ в классе C (угол отсечки около 70°). Осциллограммы тока стока транзистора контролировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Ток».

2.3 С помощью переключателя «Индуктивность» изменять индуктивность катушки выходной фильтрующе-согласующей цепи от 22 мкГн до 82 мкГн. Фиксировать форму тока стока, амплитуду напряжения выходного сигнала, а также уровень второй гармоники в его спектре с помощью осциллографа и анализатора спектра, подключаемых попеременно к гнезду «Вых», при трех значениях сопротивления нагрузки: 68 Ом, 100 Ом и 150 Ом. Полученные данные занести в табл. 1.2.

2.4 Сделать выводы о качестве работы фильтрующе-согласующей цепи.

Табл. 1.2. Результаты исследования выходной согласующей цепи

Индуктивность, мкГн	Сопротивление нагрузки, Ом	Форма тока стока	Амплитуда напряжения на нагрузке, $U_{\text{вых}}, \text{В}$	Уровень второй гармоники, $U_{2\text{вых}}, \text{мВ}$
22	68			
	100			
	150			
47	68			
	100			
	150			
68	68			
	100			
	150			
82	68			
	100			
	150			

3. Исследование режимов работы и нагрузочных характеристик УМ

3.1 Перевести переключатель «Индуктивность» в положение «47 мкГн», а переключатель «Сопротивление» – в положение «100 Ом». Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 0,5 В.

3.2 Изменяя сопротивление переменного резистора «Смещ.», задать напряжение смещение для работы УМ в классе В.

3.3 С помощью переключателя «Сопротивление» изменять сопротивление нагрузки от 10 до 220 Ом, получая различные режимы работы УМ. Форму тока

стока транзистора контролировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Ток».

3.4 Снять зависимости амплитуды напряжения на нагрузке $U_{твых}(R_n)$ и постоянной составляющей тока стока от сопротивления нагрузки $I_{c0}(R_n)$. Амплитуду напряжения на нагрузке измерять с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.». Постоянную составляющую тока стока измерять с помощью амперметра.

3.5 Рассчитать зависимости первой гармоники тока $I_{c1}(R_n)$, мощности в нагрузке $P_{вых}(R_n)$, потребляемой мощности $P_0(R_n)$ и КПД $\eta(R_n)$ от сопротивления нагрузки. Построить на одном графике зависимости $I_{c0}(R_n)$, $U_{твых}(R_n)$, на другом – $I_{c1}(R_n)$, $P_{вых}(R_n)$, $P_0(R_n)$, $\eta(R_n)$.

3.6 Сделать выводы об оптимальной работе УМ с точки зрения достижения максимальных значений выходной мощности и КПД.

4. Исследование частотной характеристики УМ

4.1 Установить переключатель «Индуктивность» в положение «47 мкГн», а переключатель «Сопротивление» – в положение «100 Ом». Убедиться, что напряжение смещения соответствует работе УМ в классе В.

4.2 Изменяя частоту входного сигнала УМ f с помощью генератора от 100 до 300 кГц с шагом 50 кГц, измерить амплитуду напряжения на нагрузке $U_{твых}$. Последнюю фиксировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Вых.». Данные измерений занести в табл. 1.3. Построить графическую зависимость амплитуды напряжения на нагрузке от частоты входного сигнала $U_{твых}(f)$.

4.3 Сделать выводы о форме частотной характеристики.

Табл. 1.3. Результаты исследования частотной характеристики УМ

Частота входного сигнала, f , кГц	Амплитуда напряжения на нагрузке, $U_{твых}$, В
100	
150	
200	

250	
300	

5. Исследование влияния напряжения электропитания на напряженность режима работы УМ

5.1 Установить переключатель «Индуктивность» в положение «47 мкГн», а переключатель «Сопротивление» – в положение «100 Ом». Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 0,5 В. Убедиться, что напряжение смещения соответствует работе УМ в классе В.

5.2 Изменяя напряжение электропитания стоковой цепи от 9 до 15 В с шагом 0,5, получить различные режимы работы УМ. Форму тока стока транзистора контролировать и фиксировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Ток».

5.3 Сделать выводы о влиянии напряжения электропитания на напряженность режима УМ.

6. Исследование динамических характеристик УМ

6.1 Настроить осциллограф для просмотра динамических характеристик УМ. Для этого первый канал осциллографа необходимо подключить к гнезду «Ток», второй канал подключить к гнезду «Сток», а осциллограф переключить в режим работы развертки «X-Y».

6.2 Установить напряжение электропитания стоковой цепи 12 В, переключатель «Индуктивность» – в положение «47 мкГн», а переключатель «Сопротивление» – в положение «100 Ом».

6.3 Убедиться, что напряжение смещения соответствует работе УМ в классе В. Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 200 кГц. Изменяя амплитуду напряжения входного сигнала в пределах от 0,3 до 0,5 В с помощью генератора, наблюдать за изменением формы динамической характеристики. Зафиксировать две-три характерные динамические характеристики, соответствующие разным режимам работы УМ по степени напряженности.

6.4 Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 0,5 В. Изменяя в небольших пределах напряжение смещения УМ, наблюдать за изменением формы динамической характеристики УМ. Зафиксировать две-три характерные динамические характеристики, соответствующие разным режимам работы УМ по углу отсечки.

6.5 Установить напряжение смещения, соответствующее работе УМ в классе В. Изменяя сопротивление нагрузки от 10 до 220 Ом, наблюдать за изменением формы динамической характеристики УМ. Зафиксировать две-три характерные динамические характеристики, соответствующие разным режимам работы УМ по степени напряженности.

7. Исследование энергетических характеристик УМ в граничном режиме

7.1 Установить переключатель «Индуктивность» в положение «47 мкГн», а переключатель «Сопротивление» – в положение «100 Ом». Переключить осциллограф в режиме поканального наблюдения осциллограмм. Выставить на генераторе частоту синусоидального сигнала 200 кГц и амплитуду напряжения 1 В.

7.2 Изменяя сопротивление переменного резистора «Смещ.», задать напряжение смещение для работы УМ в граничном режиме. Форму тока стока транзистора контролировать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду «Ток». Оценить угол отсечки тока стока.

7.3 Найти постоянную составляющую тока стока I_{c0} , амплитуду тока стока I_c , амплитуду напряжения на нагрузке $U_{твых}$.

7.4 Вычислить мощность $P_{вых}$, отдаваемую в нагрузку, а также мощность P_0 , потребляемую стоковой цепью от блока питания. Найти КПД УМ η .

7.5 Отключить электропитание макета, переведя тумблер «12В» в положение «Выкл.». При этом на лицевой панели макета светодиодный индикатор должен погаснуть.

7.6 Отключить измерительные приборы, генератор и блок питания от сети переменного тока 230 В 50 Гц и привести рабочее место в порядок. Доложить преподавателю (лаборанту) об окончании работы.

7.7 Сделать выводы и подготовить отчет по проделанной работе.

Требования к оформлению и содержанию отчета

Отчет о работе составляется в бумажном и электронном виде на стандартных листах формата А4 в соответствии с ГОСТ 7.32-2017.

Отчет должен включать:

1. Идентификатор группы, фамилию студента, дату выполнения работы на титульном листе.
2. Название, цель и краткое содержание работы.
3. Структурную схему лабораторного стенда и перечень применяемого оборудования.
4. Принципиальную схему лабораторного макета.
5. Временные диаграммы расчетных и экспериментальных данных.
6. Анализ результатов, оценку, обобщения и выводы по работе.
7. Список использованной литературы, приложения (при необходимости).
8. Ответы на вопросы и решения задач для подготовки к защите.
9. Место для подписи преподавателя (лаборанта).

Отчет по лабораторной работе должен быть составлен аккуратно и последовательно. Схемы должны быть выполнены в соответствии с требованиями единой системы конструкторской документации (ЕСКД) с применением специального программного обеспечения.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение УМ. Какими показателями характеризуется его работа?
2. Дайте характеристику классам УМ. Каковы особенности каждого из них?
3. Дайте характеристику режимам работы УМ по степени напряженности. Как на практике обеспечить смену режима работы?

4. Поясните назначение и принцип работы согласующих цепей в схеме радиочастотного УМ. Приведите схемы согласующих цепей, которые можно было бы использовать в исследуемом лабораторном макете.

5. Как выбирают емкость и индуктивность блокирующих конденсаторов и катушек в схемах радиочастотных УМ?

6. Почему напряжение на нагрузке исследуемого УМ оказывается синусоидальным при несинусоидальной форме тока, протекающего через усилительный транзистор?

7. Как на практике при настройке УМ можно определить момент достижения критического режима работы?

8. Нарисуйте и объясните работу исследуемой схемы УМ, а также приведите временные диаграммы токов и напряжений в ней. Как влияет характер нагрузки на форму выходного тока усилительного транзистора?

9. Почему в исследуемой схеме УМ при изменении частоты входного сигнала изменяется амплитуда напряжения на нагрузке?

10. Рассчитайте согласующую цепь в схеме лабораторного макета при сопротивлении нагрузки 50 Ом.

11. Разработайте в программах компьютерного моделирования Micro-Cap или Matlab Simulink модель исследуемой схемы УМ. Получите временные диаграммы, описывающие работу модели, и сравните их с полученными в результате проведения лабораторных исследований.