

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт радиоэлектроники и информационной безопасности

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

по дисциплине

«РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ»

(Часть 2)

для студентов очной и заочной форм обучения

направления 11.03.01 «Радиотехника» и

специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Севастополь

2017

УДК 621.396.1

Рецензент: канд. техн. наук, доцент **С.Р. Зиборов**

Составители: Гимпилевич Ю.Б., Сердюк И.В.

Методические указания **«Лабораторный практикум по дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы» (часть 2)** для студентов очной и заочной форм обучения направления 11.03.01 «Радиотехника» и специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» / СевГУ; сост. Ю.Б. Гимпилевич, И.В. Сердюк. — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2017. — 42 с.

Цель методических указаний — оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения в подготовке и проведении лабораторного практикума по дисциплине «Радиотехнические цепи и сигналы», а также в получении ими теоретических знаний и практических навыков анализа характеристик радиотехнических сигналов и цепей.

УДК 621.396.1

Методические рекомендации утверждены на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» от 12 января 2016 года, протокол № 6.

Методические рекомендации рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании методической комиссии Института радиоэлектроники и информационной безопасности 14 января 2016 года, протокол № 3.

Ответственный за выпуск:

д. т. н., профессор, заведующий кафедрой
«Радиоэлектроника и телекоммуникации» **Афонин И.Л.**

Издательский номер **38/17**

© ФГАОУ ВО «СевГУ», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Лабораторная работа № 1	
Нелинейное резонансное усиление и умножение частоты	5
2. Лабораторная работа № 2	
Исследование детектирования амплитудно-модулированных колебаний	15
3. Лабораторная работа № 3	
Исследование амплитудной модуляции смещением	22
4. Лабораторная работа № 4	
Исследование LC -автогенератора гармонических колебаний	28
5. Лабораторная работа № 5	
Исследование RC -автогенератора гармонических колебаний	35
Библиографический список	42

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Радиотехнические цепи и сигналы» состоит из двух частей и изучается студентами дневной и заочной форм обучения направления 11.03.01 «Радиотехника» и специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» в 4-ом и 5-ом семестрах. В соответствии с этим и лабораторный практикум по этой дисциплине состоит из двух частей. В данную методическую разработку включены лабораторные работы, соответствующие второй части дисциплины.

Методические рекомендации по выполнению каждой лабораторной работы содержат следующие разделы: цель работы; теоретическая часть; описание лабораторного макета; порядок выполнения работы; содержание отчета; выводы; контрольные вопросы.

В основу лабораторного практикума положен фронтальный метод проведения работ, суть которого заключается в том, что группа студентов, разбитая на бригады, выполняет одну и ту же лабораторную работу на различных лабораторных установках. Это позволяет синхронизировать процесс изучения теоретического материала с тематикой лабораторного практикума, а также дает возможность преподавателю по ходу занятия давать пояснения, обсуждать методику эксперимента и результаты со всей группой студентов одновременно. Фронтальный метод позволяет также студентам осуществлять предварительную подготовку к лабораторным занятиям, поскольку их тематика заранее известна.

Преподаватель в начале занятия проводит краткий опрос студентов и допускает их к проведению лабораторной работы.

Бригада состоит, как правило, из 2-3 студентов. В процессе выполнения работы студенты должны вести подробный протокол, в котором излагают весь ход работы, фиксируют результаты экспериментов. После завершения работы преподаватель просматривает полученные данные и подписывает протокол. На основании протокола каждый студент оформляет отчет, который должен иметь титульный лист и содержать следующие разделы: цель работы; схему лабораторного макета; экспериментальные данные (таблицы с результатами измерений, осциллограммы и др.); результаты обработки экспериментальных данных (графики, диаграммы, измеренные и рассчитанные параметры и др.); выводы по работе.

Защита отчета проводится на очередном занятии перед выполнением следующей лабораторной работы.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

НЕЛИНЕЙНОЕ РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ И УМНОЖЕНИЕ ЧАСТОТЫ

1.1. Цель работы

Исследование характеристик нелинейного резонансного усилителя, удвоителя и утроителя частоты в различных режимах.

1.2. Теоретическая часть

1.2.1. Принцип нелинейного резонансного усиления

Резонансные усилители, работающие в линейном режиме, широко используются в современной радиотехнике. На их основе строятся маломощные каскады усиления радиосигналов (УВЧ и УПЧ приемников, предварительные ВЧ усилительные каскады передатчиков). Недостатком линейного принципа усиления является низкий коэффициент полезного действия (КПД). По этой причине эти усилители не применяют в выходных каскадах радиопередающих устройств.

Стремление повысить КПД выходных каскадов радиопередающих устройств привело к разработке принципа нелинейного резонансного усиления. Схема нелинейного резонансного усилителя не отличается от схемы линейного резонансного усилителя. Она состоит из активного элемента (транзистора или электронной лампы) и нагрузки в виде колебательного контура.

Принципиальное отличие состоит в режиме работы. В отличие от линейного режима, при котором начальное смещение на активный элемент задается в середине наиболее линейного участка ВАХ, в нелинейном режиме начальное смещение на активном элементе задается в районе напряжения отсечки. Кроме того, амплитуда сигнала, подаваемого на усилительный элемент, выбирается достаточно большой, что обеспечивает отсечку тока, протекающего через этот элемент.

Рассмотрим схему транзисторного резонансного усилителя, которая изображена на рис. 1.1.

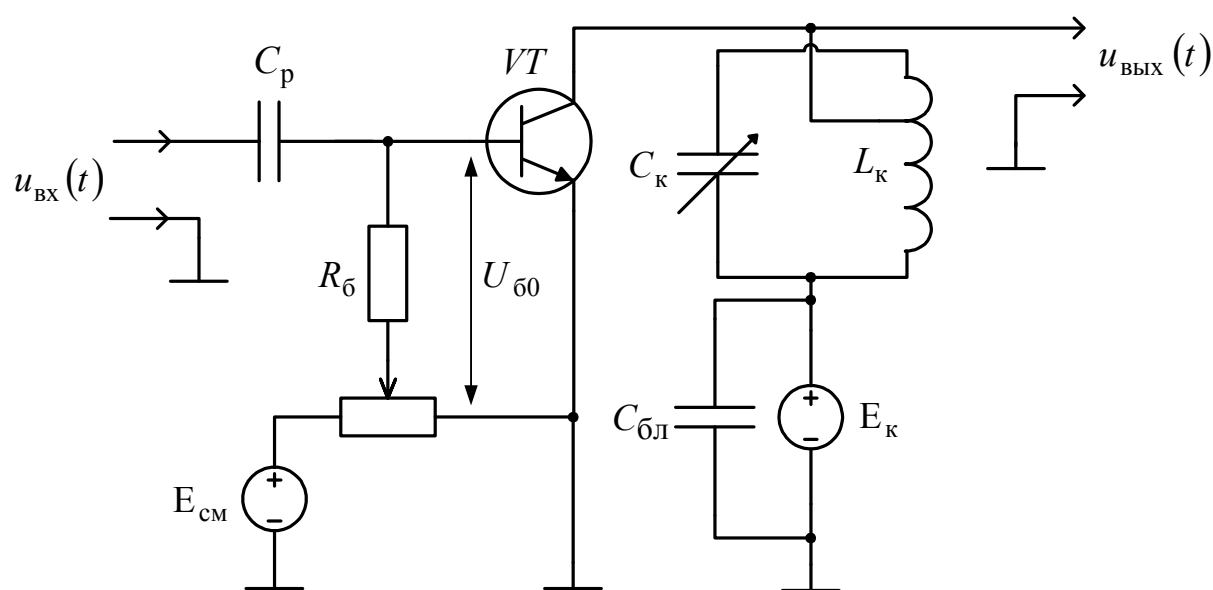


Рис. 1.1 — Принципиальная схема нелинейного резонансного усилителя

Эта схема состоит из транзистора VT , в коллекторную цепь которого включен колебательный контур (L_k, C_k). Смещение на базу подается от источника $E_{см}$ и может регулироваться с помощью потенциометра.

Пусть на вход усилителя подается немодулированное гармоническое колебание высокой частоты (режим несущей) достаточно большой амплитуды

$$u_{вх}(t) = U_m \cos(\omega_1 t), \quad (1.1)$$

где U_m — амплитуда входного сигнала; ω_1 — круговая частота входного сигнала.

Тогда напряжение на базе, представляющее собой сумму входного сигнала и постоянного напряжения смещения $U_{б0}$, будет равно

$$u_{бэ}(t) = U_{б0} + U_m \cos(\omega_1 t). \quad (1.2)$$

Применим кусочно-линейную аппроксимацию ВАХ транзистора, что допустимо в режиме больших амплитуд [1, 2]. Аппроксимированная ВАХ транзистора (зависимость тока коллектора от напряжения между базой и эмиттером) изображена на рис. 1.2.

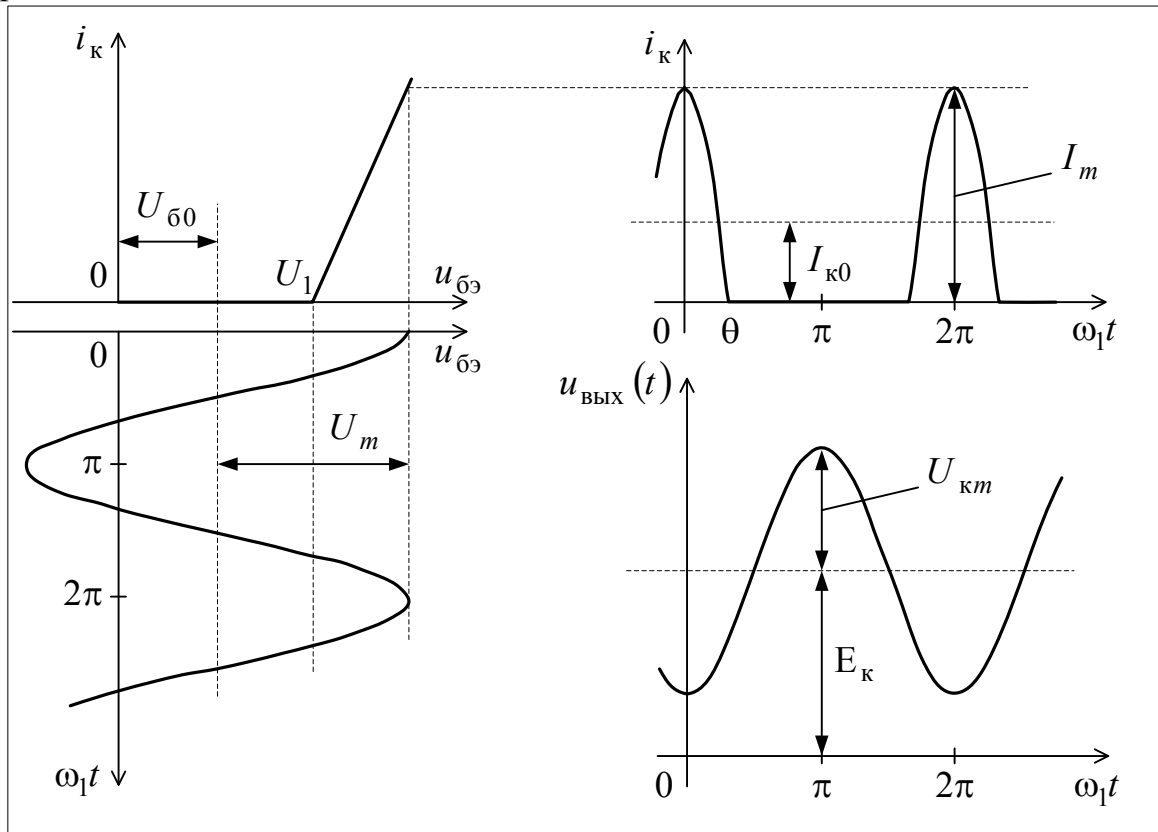


Рис. 1.2 — Графики, поясняющие принцип действия нелинейного резонансного усилителя

Зададим начальное смещение на транзисторе $U_{б0}$ в районе напряжения отсечки U_1 . При этом в цепи коллектора будет протекать периодический импульсный ток той же частоты ω_1 (см. рис. 1.2). График тока построен с использованием метода параллельного переноса. Спектр коллекторного тока определим, разложив его в ряд Фурье [1]:

$$i_k(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(t), \quad (1.3)$$

где I_0 — постоянная составляющая тока коллектора; I_n — амплитуда n -ой гармоники коллекторного тока; n — номер гармоники.

Спектр амплитуд коллекторного тока показан на рис. 1.3.

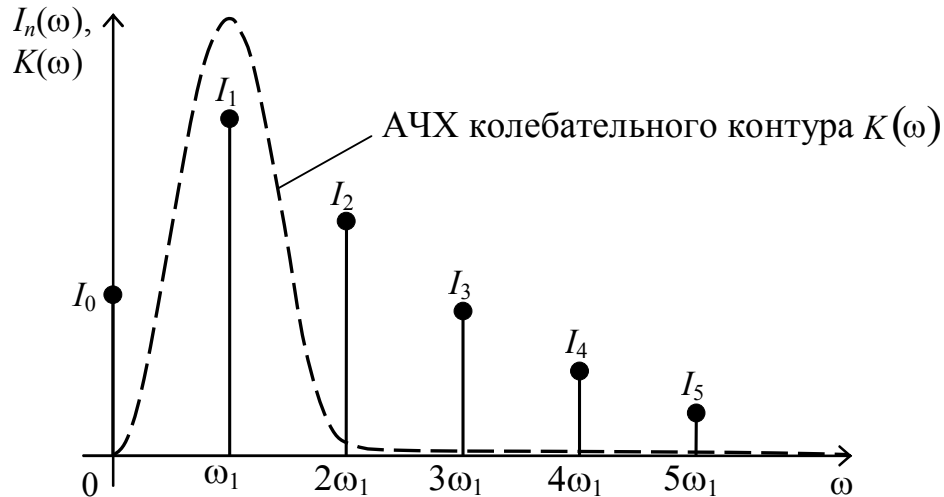


Рис. 1.3 — Спектрограмма амплитуд коллекторного тока

Амплитуды гармоник спектра рассчитываются по одной из формул [1, 2]

$$I_{kn} = SU_m \gamma_n(\theta) = I_m \alpha_n(\theta),$$

где S — крутизна аппроксимированной ВАХ транзистора; θ — угол отсечки коллекторного тока; I_m — амплитуда импульса коллекторного тока; $\gamma_n(\theta)$, $\alpha_n(\theta)$ — коэффициенты А.И. Берга.

Угол отсечки определяется в соответствии с формулой [1, 2]:

$$\cos(\theta) = (U_1 - U_{60})/U_m. \quad (1.4)$$

Колебательный контур, включенный в коллекторную цепь транзистора, настроен на частоту входного сигнала ($\omega_p = \omega_1$), поэтому только первая гармоника коллекторного тока создает существенное напряжение на контуре. Сопротивление колебательной системы на частотах $2\omega_1$, $3\omega_1$ и т.д. столь мало, что высшие гармоники практически не создают напряжения на выходе, т.е. осуществляется частотная избирательность (см. АЧХ контура усилителя на рис. 1.3). Таким образом, на выходе усилителя будет наблюдаться сигнал, близкий по форме к гармоническому.

Амплитуда выходного напряжения на контуре U_{km} определяется по формуле (без учета влияния внутреннего сопротивления транзистора на контур) [1, 2]:

$$U_{km} = SU_m \gamma_1(\theta) R_0 = S_{cp} U_m R_0, \quad (1.5)$$

где R_0 — резонансное сопротивление контура.

Величину $S_{cp} = S \gamma_1(\theta)$ называют средней крутизной.

Важной характеристикой резонансного усилителя, учитывающей только

первую гармонику, является колебательная характеристика. Колебательной характеристикой называется зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного напряжения $U_{km} = f(U_m)$.

Анализ (1.5) показывает, что эта характеристика имеет нелинейный характер. Это объясняется тем, что в соответствии с (1.4) угол отсечки, а значит и первый коэффициент Берга, а поэтому и средняя крутизна, зависят от амплитуды входного сигнала U_m . Вид колебательной характеристики зависит от напряжения смещения U_{60} , поскольку угол отсечки в соответствии с (1.4) зависит от этого напряжения. Для работы резонансного усилителя без нелинейных искажений необходимо, чтобы колебательная характеристика в диапазоне изменений входного сигнала, была линейной.

Из выражений (1.4) и (1.5) следует, что линейность колебательной характеристики обеспечивается, если угол отсечки равен

$$\theta = \pi/2. \quad (1.6)$$

Именно по этой причине для усиления радиосигналов с амплитудной модуляцией используют режим работы с углом отсечки $\theta = \pi/2$.

Коэффициент усиления резонансного усилителя определяется выражением [1]:

$$K(\omega_p) = U_{km}/U_m = S_{cp} R_0. \quad (1.7)$$

Особенность нелинейного усилителя заключается в том, что коэффициент усиления зависит от амплитуды входного сигнала и напряжения смещения, поскольку средняя крутизна зависит от этих параметров.

1.2.2. Энергетические соотношения в нелинейном резонансном усилителе

Важнейшей характеристикой усилителя мощности является КПД. В соответствии с [1] КПД нелинейного резонансного усилителя η в предельном режиме (режим максимальной амплитуды выходного сигнала) определяется соотношением

$$\eta = \frac{P_{\approx}}{P_0} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_1(\theta)}{\gamma_0(\theta)}, \quad (1.8)$$

где P_0 — мощность, потребляемая от источника питания; $P_{\approx}$ — полезная активная мощность, поступающая в колебательный контур.

Из (1.8) следует, что в предельном режиме КПД зависит от угла отсечки. При угле отсечки $\theta = 0$, КПД максимален и равен единице. С ростом θ КПД уменьшается (см. рис. 1.4).

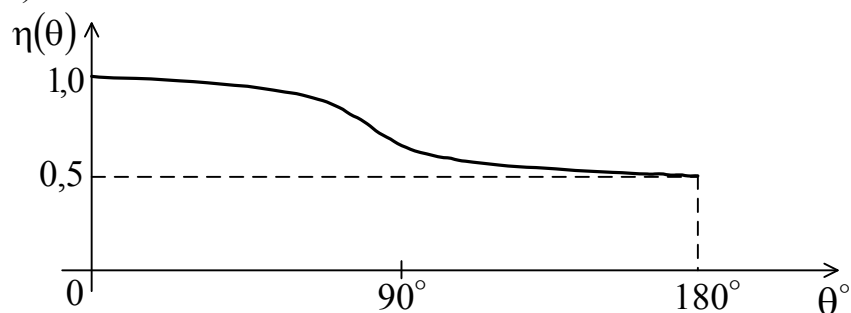


Рис. 1.4 — Зависимость КПД усилителя от угла отсечки

Поэтому для повышения КПД необходимо уменьшать угол отсечки. При этом резко снижается коэффициент γ_1 и для получения заданной мощности приходится существенно увеличивать амплитуду входного сигнала, что вызывает значительные технические трудности. Реально достижимые значения угла отсечки составляют $80^\circ \dots 100^\circ$. При этом КПД равен $(70 \dots 80) \%$.

1.2.3. Резонансное умножение частоты

Резонансное умножение частоты — это операция, в результате которой на выходе умножителя формируется высокочастотный сигнал, частота которого в n раз превышает частоту входного высокочастотного сигнала, где $n = 2, 3, \dots$.

Потребность в умножителях возникает, например, при создании источников гармонических колебаний с высокой стабильностью частоты, если непосредственное генерирование таких колебаний в заданном частотном диапазоне невозможно, однако в распоряжении имеется стабильный менее высокочастотный генератор.

Схема резонансного умножителя частоты совпадает со схемой нелинейного резонансного усилителя, приведенной на рис. 1.1. Отличие состоит в том, что резонансный контур настраивается на n -ю гармонику ($\omega_p = n\omega_1$). Кроме того, угол отсечки в умножителе выбирается из соображений получения максимальной амплитуды n -ой гармоники тока. Такой угол отсечки называют оптимальным.

Если угол отсечки изменять путем изменения только напряжения смещения U_{60} , оставляя амплитуду входного сигнала постоянной ($U_m = const$), то оптимальный угол отсечки будет соответствовать максимуму коэффициента γ_n . Этот угол отсечки определяется по формуле [2]:

$$\theta_{\text{опт}}^\gamma = 180^\circ / n. \quad (1.9)$$

Для полного использования энергетических возможностей электронного прибора амплитуда импульса тока должна быть максимальной. Если угол отсечки изменять путем изменения напряжения смещения U_{60} и амплитуды входного сигнала U_m , оставляя неизменной амплитуду импульса тока ($I_m = const$), то оптимальный угол будет соответствовать максимуму коэффициента α_n . Этот угол отсечки определяется по формуле [1]:

$$\theta_{\text{опт}}^\alpha = 120^\circ / n. \quad (1.10)$$

Амплитуда выходного сигнала умножителя при кусочно-линейной аппроксимации ВАХ транзистора определяется по формуле [1]:

$$U_{km} \cong S U_m \gamma_n(\theta) R_0. \quad (1.11)$$

1.3. Описание лабораторной установки

Установка состоит из базового блока питания, к которому пристыковывается лабораторный макет. Принципиальная схема лабораторного макета для исследования нелинейного резонансного усиления и умножения частоты с органами управления приведена на рис. 1.5. В схеме применен кремниевый транзистор VT , напряжение отсечки которого может лежать в пределах $(0,4 \dots 0,7)$ В. Входной сигнал следует подавать относительно корпуса на гнездо $\Gamma 1$, выходной снимать с гнезда

ГЗ. Напряжение смещения регулируется с помощью потенциометра «Смещение» и измеряется вольтметром, расположенным на базовом блоке питания со шкалой 2 В.

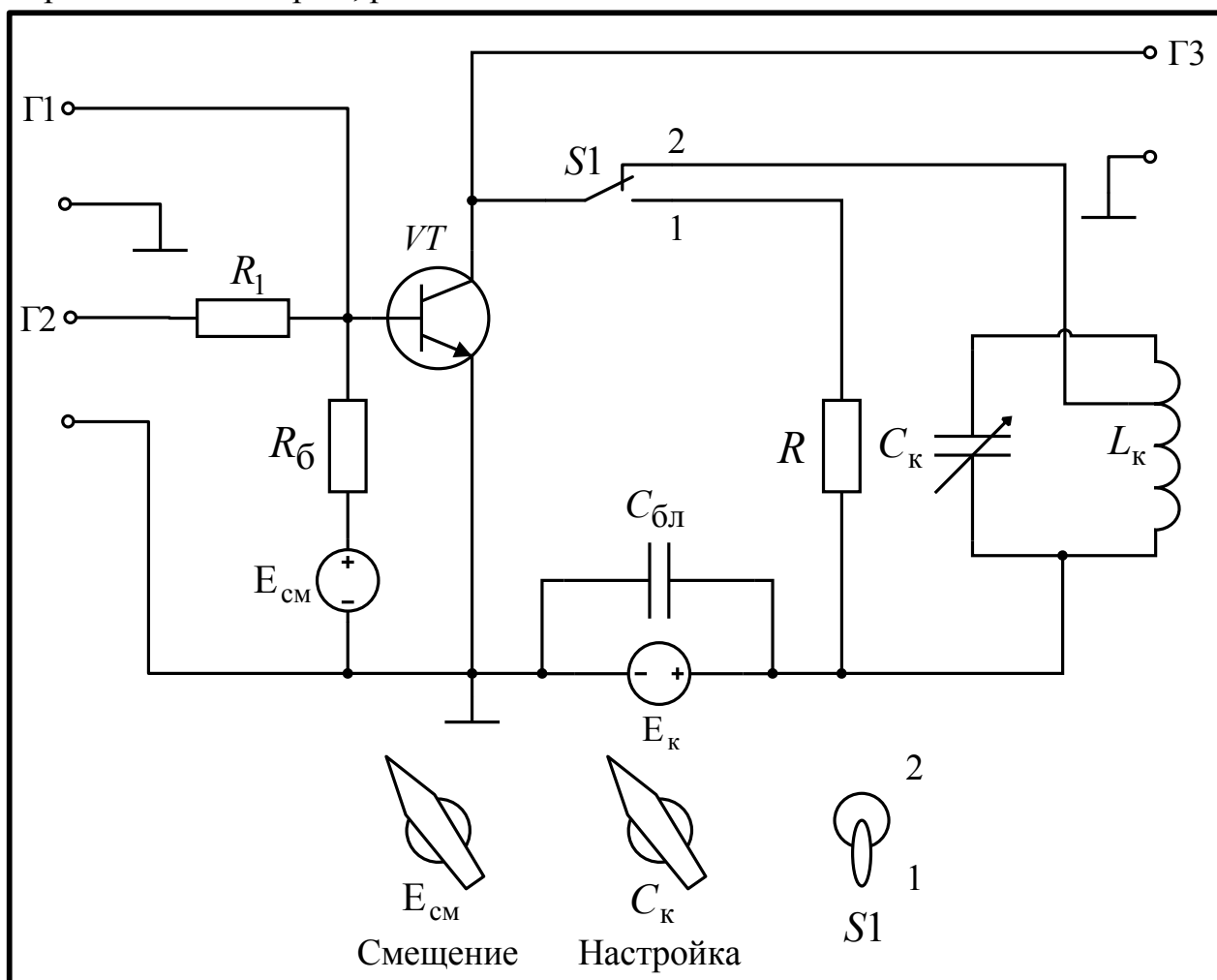


Рис. 1.5 — Принципиальная схема лабораторного макета

Нагрузкой транзистора является колебательный контур, включенный частично что уменьшает влияние внутреннего сопротивления транзистора на контур. Контур можно перестраивать, изменяя емкость конденсатора, вращая ручку «Настройка».

Для того чтобы наблюдать на осциллографе форму коллекторного тока, предусмотрено включение в коллекторную цепь вспомогательного резистора R . При этом напряжение на коллекторе (гнездо ГЗ) повторяет по форме импульсный ток (инвертированный), протекающий через транзистор. По этой осциллограмме экспериментально определяется угол отсечки (см. рис. 1.6). по формуле

$$\theta^\circ = 180^\circ \frac{t_1}{t_1 + t_2}. \quad (1.12)$$

Угол отсечки определяют по следующей методике:

- тумблер $S1$ на панели макета установить в положение «Резистор»;
- подключить вход СН1 осциллографа к гнезду ГЗ. Получить осциллограмму коллекторного тока (см. рис. 1.6);
- измерить интервалы t_1 и t_2 ;
- по формуле (1.12) рассчитать угол отсечки.

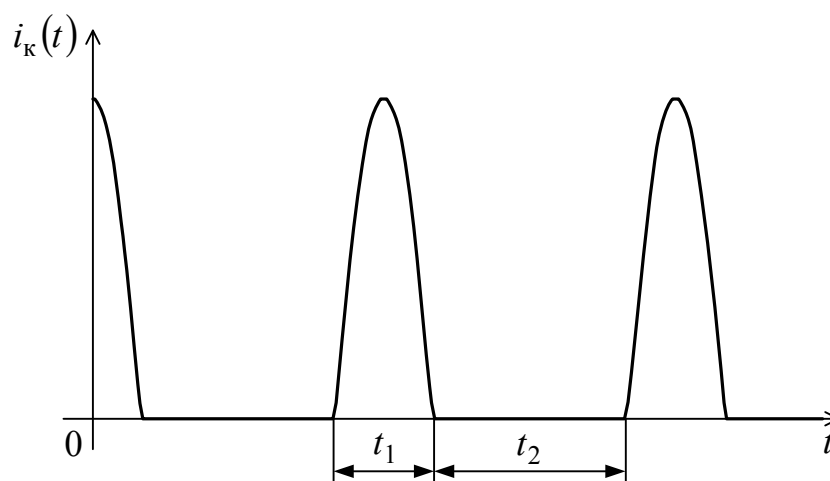


Рис. 1.6 — Осциллограмма коллекторного тока (к определению угла отсечки)

1.4. Порядок выполнения работы

1.4.1. Сборка схемы исследования нелинейного усилителя

1.4.1.1. Включить в сеть лабораторную установку, генератор ВЧ, осциллограф и вольтметр переменного тока.

1.4.1.2. Выход генератора ВЧ «0,1...1 В» подключить к гнезду Г1.

1.4.1.3. Вход СН1 осциллографа подключить к выходному гнезду макета ГЗ.

1.4.1.4. Вольтметр переменного тока подключить к гнезду Г1.

1.4.1.5. Тумблер $S1$ установить в положение 2 (контур).

1.4.1.6. Вращая ручку «Настройка» по часовой стрелке до упора, установить максимальную емкость контура (минимальная резонансная частота).

1.4.2. Проверка работоспособности усилителя

1.4.2.1. С помощью аттенюатора генератора ВЧ установить на входе усилителя сигнал порядка (100...200) мВ. Измерение производить вольтметром переменного тока, подключенным к входному гнезду Г1.

1.4.2.2. Перестраивая частоту генератора ВЧ, добиться настройки контура усилителя в резонанс, наблюдая процесс по осциллографу, подключенному к выходу усилителя (гнездо ГЗ).

1.4.2.3. Записать значение резонансной частоты. Зарисовать друг под другом осциллограммы входного и выходного сигналов (гнезда Г1 и ГЗ, соответственно), нанеся на них амплитуду и период. Убедиться в наличии эффекта усиления, определив коэффициент усиления.

1.4.3. Экспериментальное определение напряжения отсечки транзистора

1.4.3.1. Установить тумблер $S1$ в положение 1 (резистор). При этом наблюдать на экране осциллографа, подключенного к гнезду ГЗ осциллограмму тока (см. рис. 1.6).

1.4.3.2. Вращая потенциометр «Смещение» добиться равенства $t_1 = t_2$ (см. рис. 1.6). Это соответствует $\theta^\circ = 90^\circ$, т.е. $U_{60} = U_1$.

1.4.3.3. Определить напряжение отсечки, сняв показания со шкалы вольтметра базового блока.

1.4.4. Расчет амплитуд входного сигнала

1.4.4.1. Рассчитать, выразив из формулы (1.4), амплитуду сигнала U_{m1} , которую следует подать на вход при заданном смещении $U_{601} = 0,8 \text{ В}$, чтобы получить угол отсечки $\theta_{1\text{теор}}^\circ = 120^\circ$.

1.4.4.2. Рассчитать, выразив из формулы (1.4), амплитуду сигнала U_{m2} , которую следует подать на вход при заданном смещении $U_{602} = 0,4 \text{ В}$, чтобы получить угол отсечки $\theta_{2\text{теор}}^\circ = 60^\circ$.

1.4.5. Экспериментальное определение углов отсечки

1.4.5.1. Вращая потенциометр «Смещение», установить $U_{601} = 0,8 \text{ В}$ по вольтметру базового блока.

1.4.5.2. С помощью аттенюатора генератора ВЧ установить на входе (гнездо Г1) расчетное значение амплитуды U_{m1} . При этом следует учесть, что вольтметр переменного тока проградуирован в действующих значениях, поэтому амплитуде сигнала U_m соответствует действующее значение:

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m.$$

1.4.5.3. Зарисовать осциллограмму тока и нанести значения t_1 и t_2 (см. рис. 1.6).

1.4.5.4. Установить напряжение смещения $U_{602} = 0,4 \text{ В}$.

1.4.5.5. С помощью аттенюатора генератора ВЧ установить на входе (гнездо Г1) расчетное значение амплитуды U_{m2} .

1.4.5.6. Повторить пункт 1.4.5.3.

1.4.6. Снятие колебательных характеристик при различных смещениях

1.4.6.1. Установить тумблер $S1$ в положение «2» (контур).

1.4.6.2. Установить смещение $U_{60} = 0,8 \text{ В}$.

1.4.6.3. Изменяя амплитуду входного сигнала U_m с помощью аттенюатора генератора ВЧ, снять зависимость $U_{km} = f(U_m)$, заполнив таблицу 1.1.

Напряжение на входе и выходе измерять при помощи вольтметра переменного тока, подключая его к гнездам Г1 и Г3 поочередно.

1.4.6.4. Установить смещение $U_{60} = 0,5 \text{ В}$. Повторить пункт 1.4.6.3.

1.4.6.5. Установить смещение $U_{60} = 0,3 \text{ В}$. Повторить пункт 1.4.6.3.

Таблица 1.1 — Колебательные характеристики нелинейного усилителя

	$U_m, \text{ В}$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_{60} = 0,8 \text{ В}$	U_{km}											
$U_{60} = 0,5 \text{ В}$	U_{km}											
$U_{60} = 0,3 \text{ В}$	U_{km}											

1.4.7. Исследование режима умножения частоты

1.4.7.1. Установить на входе (гнездо Г1) напряжение амплитудой $(0,5 \dots 0,7) \text{ В}$.

1.4.7.2. Подключить вход СН1 осциллографа к выходному гнезду Г3 и, вращая

ручку «Настройка» на панели макета, добиться появления второй гармоники.

1.4.7.3. Изменяя смещение U_{60} , добиться максимальной амплитуды напряжения второй гармоники.

1.4.7.4. Зарисовать друг под другом осциллограммы входного и выходного сигналов. Нанести на осциллограммах амплитуды и периоды сигналов.

1.4.7.5. Переключить тумблер $S1$ в положение «1» (резистор). Зарисовать осциллограмму тока. Нанести на осциллограмме интервалы t_1 и t_2 .

1.4.7.6. Переключить тумблер $S1$ в положение «2». Вращая ручку «Настройка», добиться появления третьей гармоники. Повторить пункты 1.4.7.3...1.4.7.5.

1.5. Оформление отчета

1.5.1. Сформулировать цель работы.

1.5.2. Изобразить принципиальную схему макета.

1.5.3. Изложить методику измерения напряжения отсечки и привести экспериментальное значение напряжения отсечки.

1.5.4. Привести расчетные значения амплитуд входного сигнала для получения теоретических углов отсечки 120° и 60° , а также осциллограммы тока и результаты расчета по ним экспериментальных углов отсечки.

1.5.5. Привести таблицу 1.1 и графики колебательных характеристик для различных смещений. По этим графикам рассчитать и построить графики зависимости коэффициента усиления усилителя от амплитуды входного сигнала.

1.5.6. Привести друг под другом в едином временном и амплитудном масштабах осциллограммы входного напряжения, тока коллектора и выходного напряжения в режимах усиления, удвоения частоты и утроения частоты.

1.5.7. Привести осциллограммы коллекторного тока при удвоении и утроении частоты в оптимальном режиме. Рассчитать по ним оптимальные углы отсечки. Сравнить с теоретическими значениями, полученными по формуле (1.9).

1.6. Выводы

В выводах следует отразить следующее:

— привести экспериментально полученное напряжение отсечки, сравнить его с типовыми значениями;

— оценить степень соответствия теоретически рассчитанных углов отсечки и полученных экспериментально, указать причины несоответствия;

— определить особенности колебательных характеристик при различных смещениях;

— установить наличие оптимальных углов отсечки для второй и третьей гармоник и степень соответствия теории и эксперимента в этом плане.

1.7. Контрольные вопросы

1.7.1. В каких радиотехнических устройствах используются резонансные усилители, работающие в нелинейном режиме?

1.7.2. Каковы принципиальные преимущества нелинейного режима работы резонансного усиления? За счет чего они достигаются?

1.7.3. Изобразите схему нелинейного резонансного усилителя и поясните назначение отдельных элементов и принцип действия.

1.7.4. Какова форма коллекторного тока и напряжения на выходе нелинейного резонансного усилителя (изобразить)?

1.7.5. Дайте определение угла отсечки тока, протекающего через нелинейный элемент. В каких пределах он может изменяться?

1.7.6. Как зависит КПД нелинейного резонансного усилителя от угла отсечки?

1.7.7. Поясните принцип нелинейного резонансного умножения частоты.

1.7.8. Дайте определение оптимального угла отсечки и приведите формулы для его расчета.

1.7.9. Изложите методику экспериментального определения угла отсечки.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНО-МОДУЛИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ

2.1. Цель работы

Исследование процесса детектирования амплитудно-модулированных (АМ) колебаний диодным детектором.

2.2. Теоретическая часть

2.2.1. Принцип детектирования АМ колебаний

При амплитудной модуляции огибающая радиосигнала изменяется по закону передаваемого сообщения. При этом возникает приращение амплитуды радиосигнала, прямопропорциональное модулирующему сигналу, а частота и начальная фаза остаются неизменными. Аналитическая запись АМ колебания имеет вид

$$u(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0), \quad (2.1)$$

где ω_0 — частота несущего колебания; θ_0 — начальная фаза несущего колебания; $U(t)$ — амплитуда (огибающая) радиосигнала.

В соответствии с приведенным определением амплитуду радиосигнала с АМ можно записать в виде соотношения [3]:

$$U(t) = U_{m0} + k_{\text{ам}} s(t), \quad (2.2)$$

где U_{m0} — амплитуда несущего колебания; $k_{\text{ам}}$ — коэффициент пропорциональности, величина которого выбирается так, чтобы при любых значениях t обеспечивалось выполнение условия $U(t) \geq 0$ (амплитуда не может быть отрицательной).

Если модулирующий сигнал представляет собой гармоническое колебание, то такую модуляцию называют тональной. Мгновенное значение радиосигнала с тональной амплитудой модуляцией (ТАМ) получим, используя (2.1) и (2.2) [1, 3]:

$$u(t) = U_{m0} [1 + M \cos(\Omega_1 t + \nu_1)] \cos(\omega_0 t + \theta_0), \quad (2.3)$$

где M — коэффициент амплитудной модуляции; Ω_1 — круговая частота модулирующего сигнала; ν_1 — начальная фаза модулирующего сигнала.

Чтобы определить спектр колебания с ТАМ, преобразуем выражение (2.3) к виду

$$\begin{aligned} u(t) = U_{m0} \cos(\omega_0 t + \theta_0) + \frac{U_{m0} M}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega_1)t + \theta_0 + \nu_1] + \\ + \frac{U_{m0} M}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega_1)t + \theta_0 - \nu_1]. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Из выражения (2.4) видно, что колебание $u(t)$ состоит из трех высокочастотных составляющих. Спектрограмма амплитуд иллюстрируется рис. 2.1. Из этого рисунка следует, что ширина спектра радиосигнала $\Delta\omega$ с ТАМ равна удвоенной частоте модулирующего сигнала

$$\Delta\omega = 2\Omega_1. \quad (2.5)$$

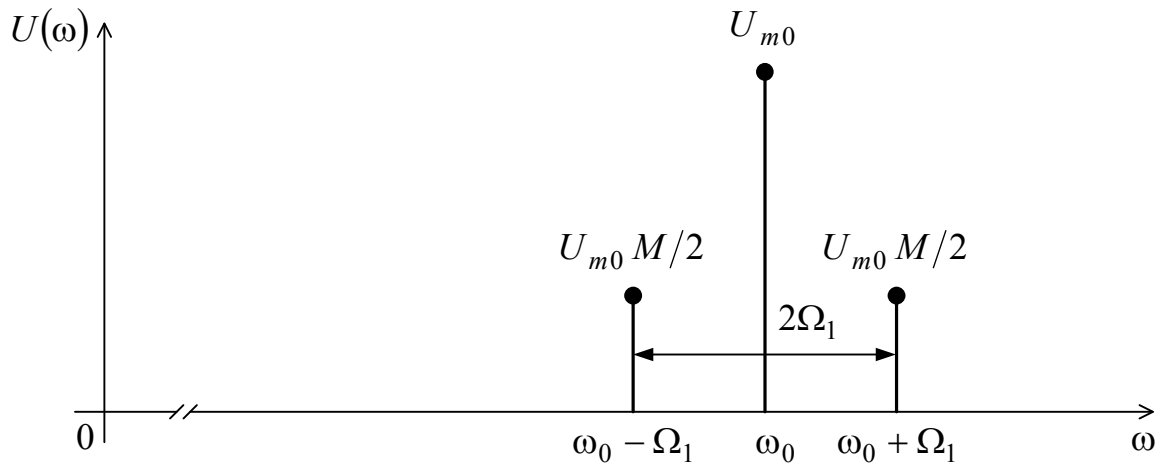


Рис. 2.1 — Спектр амплитуд радиосигнала при тональной АМ

Рассмотрим случай модуляции сложным сигналом, представляющим сумму гармонических колебаний с частотами $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3 \dots \Omega_{\max}$, где $\Omega_{\max}$ — максимальная частота модулирующего сигнала. Промодулированное колебание при этом можно записать в виде

$$u(t) = U_{m0}(1 + M_1 \cos \Omega_1 t + M_2 \cos \Omega_2 t + \dots + M_n \cos \Omega_{\max} t) \cos(\omega_0 t + \theta_0). \quad (2.6)$$

Коэффициенты $M_1; M_2 \dots M_n$ называются парциальными коэффициентами амплитудной модуляции. Для этих коэффициентов должно выполняться неравенство

$$\sum_{i=1}^n M_i \leq 1. \quad (2.7)$$

При этом спектр радиосигнала состоит из несущего колебания и колебаний с частотами $(\omega_0 \pm \Omega_1); (\omega_0 \pm \Omega_2) \dots (\omega_0 \pm \Omega_{\max})$, которые образуют две симметричные боковые полосы (см. спектрограмму на рис. 2.2).

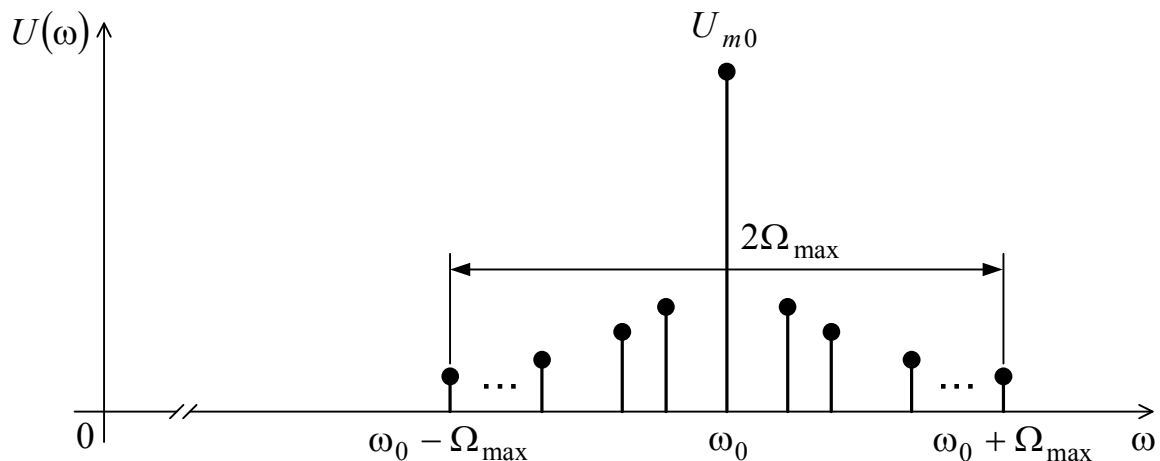


Рис. 2.2 — Спектр АМ колебания при модуляции сложным сигналом

Ширина спектра такого колебания равна

$$\Delta\omega = 2\Omega_{\max}. \quad (2.8)$$

Устройства, предназначенные для извлечения сообщения из радиосигнала, называют детекторами. Задача детектирования АМ колебания состоит в том, чтобы на выходе детектора получить низкочастотное колебание, пропорциональное амплитуде $U(t)$ входного высокочастотного колебания (режим линейного детектирования). Исходя из этого определения, запишем выражение для выходного напряжения идеального амплитудного детектора (АД)

$$u_{\text{вых}}(t) = k_d U(t), \quad (2.9)$$

где k_d — коэффициент пропорциональности.

Выходной сигнал идеального амплитудного детектора повторяет форму огибающей $U(t)$ входного радиосигнала. Спектрограмма амплитуд выходного сигнала амплитудного детектора для случая детектирования сигнала (2.6) изображена на рис. 2.3.

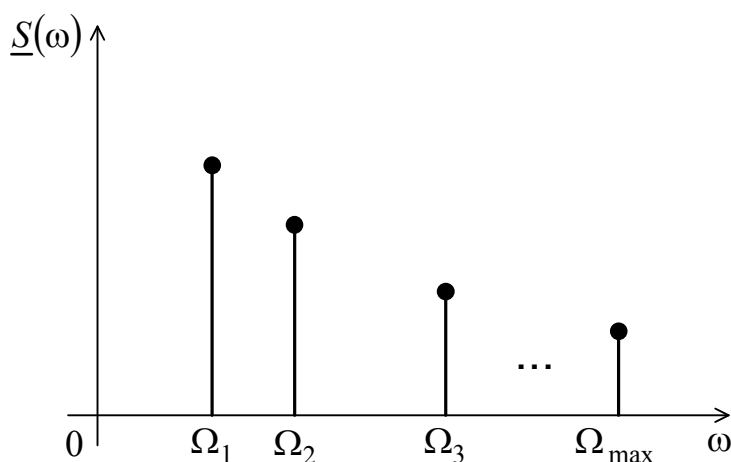


Рис. 2.3 — Спектрограмма амплитуд сигнала на выходе АД

Детектирование сопровождается трансформацией частотного спектра в область низких частот и не может быть осуществлено без применения нелинейных элементов. В качестве нелинейного элемента обычно используется полупроводниковый диод. Детектирование, при котором преобразующим элементом служит диод, называют диодным.

Простейшая схема диодного амплитудного детектора (рис. 2.4) состоит из диода VD и фильтра нижних частот (ФНЧ), который образован параллельным включением резистора R и конденсатора C .

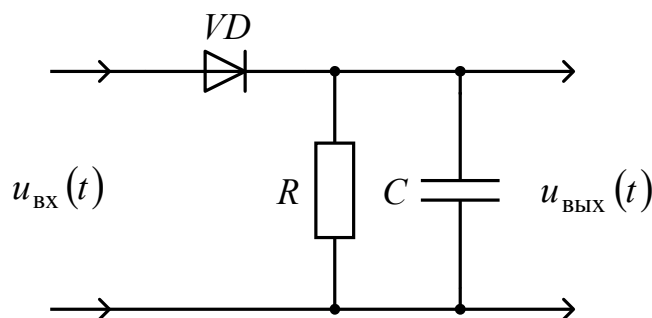


Рис. 2.4 — Схема диодного амплитудного детектора

ФНЧ включен последовательно с диодом и предназначен для выделения из тока, протекающего через диод, низкочастотной составляющей.

При выборе элементов фильтра нужно исходить из условия:

$$\frac{1}{\omega_0 C} \ll R \ll \frac{1}{\Omega_{\max} C},$$

что обеспечит подавление высокочастотных составляющих и выделение низкочастотных составляющих тока, протекающего через диод. Из приведенного неравенства вытекает условие

$$\frac{1}{\omega_0} \ll \tau \ll \frac{1}{\Omega_{\max}}, \quad (2.10)$$

где $\tau = RC$ — постоянная времени RC -цепи; $\Omega_{\max}$ — максимальная частота в спектре модулирующего сигнала.

Важными характеристиками амплитудных детекторов являются характеристики детектирования. Статическая характеристика — это зависимость постоянной составляющей тока диода (или постоянного напряжения на выходе детектора) от амплитуды (или действующего значения) входного несущего колебания. Динамическая характеристика — это зависимость амплитуды (или действующего значения) выходного сигнала детектора от коэффициента амплитудной модуляции.

При малых амплитудах входного сигнала (не более 0,1...0,2 В), имеет место квадратичное детектирование, а при больших амплитудах (более 0,5 В) режим детектирования является линейным.

2.2.2. Работа амплитудного детектора в режиме больших амплитуд (линейное детектирование)

При анализе работы диодного детектора в режиме больших амплитуд применяется кусочно-линейная аппроксимация ВАХ диода. На рис. 2.5 изображены диаграммы, поясняющие работу детектора в режиме линейного детектирования.

Особенностью диодных детекторов является наличие автоматического смещения на диоде, которое появляется при подаче на вход АД высокочастотного сигнала. При этом на выходе АД появляется напряжение, запирающее диод, что приводит к уменьшению угла отсечки тока. Этот угол зависит только от сопротивления нагрузки детектора R и крутизны линеаризованной ВАХ диода S и приближенно определяется по формуле [2]:

$$\theta \approx 3 \sqrt{\frac{3\pi}{SR}}. \quad (2.11)$$

Сигнал на выходе линейного детектора в соответствии с (2.9) пропорционален амплитуде входного ВЧ сигнала. Коэффициент пропорциональности k_d зависит только от угла отсечки и определяется соотношением [1, 2]:

$$k_d = \cos \theta. \quad (2.12)$$

Входное сопротивление линейного диодного детектора по первой гармонике равно [1]:

$$R_{\text{вх}} = R/2. \quad (2.13)$$

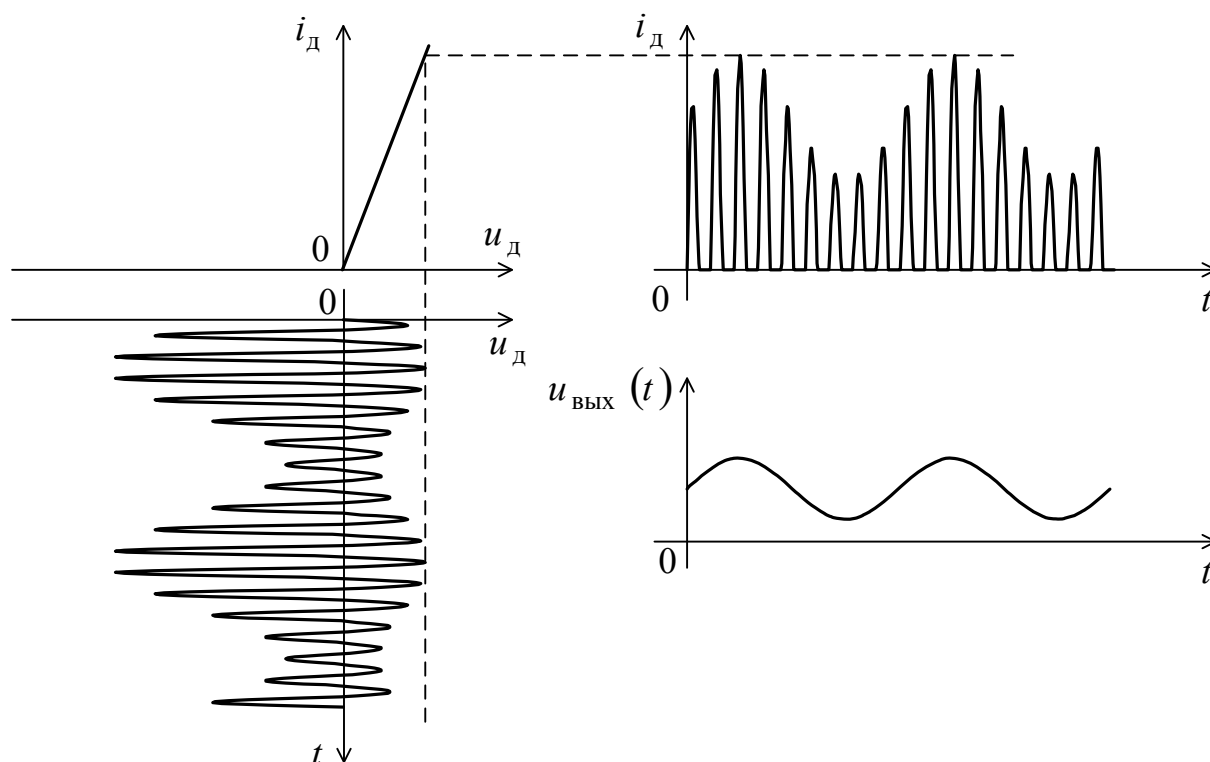


Рис. 2.5 — Диаграммы работы амплитудного детектора

2.3. Описание лабораторной установки

Установка состоит из базового блока питания, к которому пристыковывается лабораторный макет. Схема лабораторного макета для исследования амплитудного детектирования изображена на рис. 2.6.

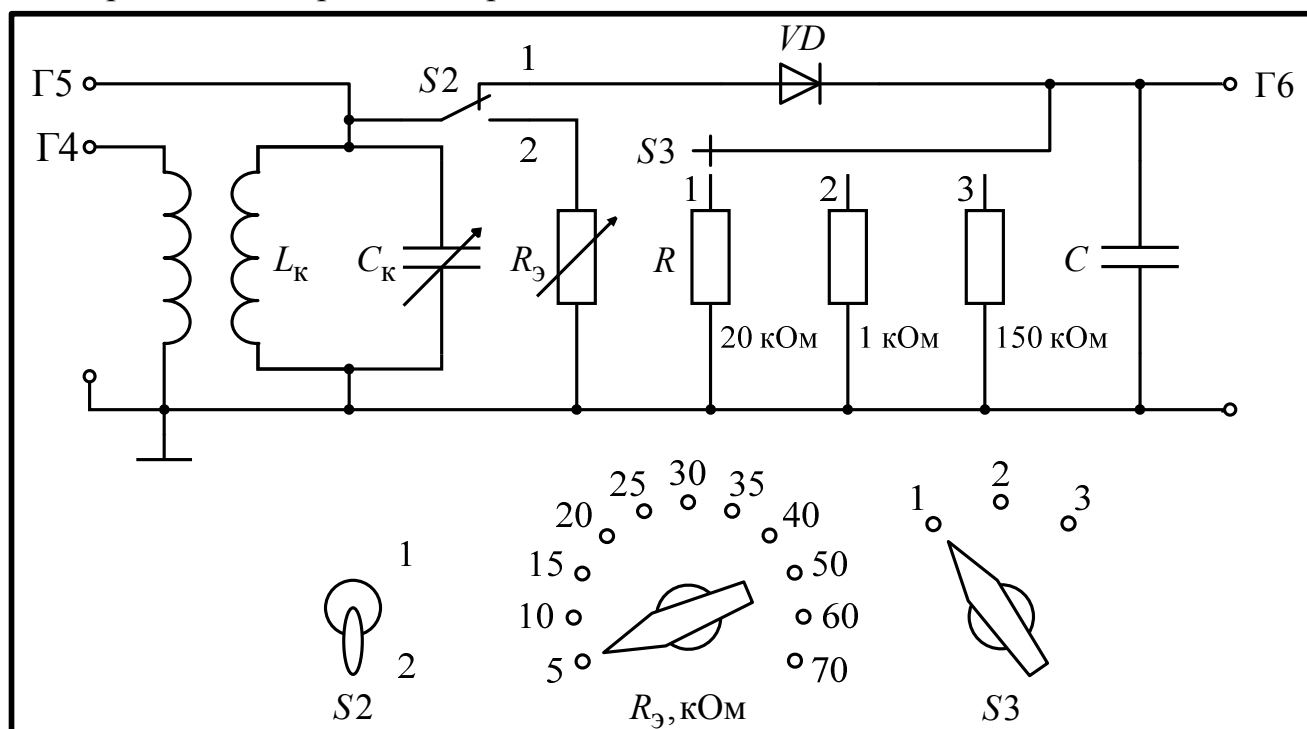


Рис. 2.6 — Схема лабораторного макета

При исследовании процесса детектирования внешнее АМ колебание следует

подавать на гнездо Г4. К LC -контур подключается либо детектор (положение «1», тумблер $S2$), либо эквивалентное сопротивление замещения детектора R_3 (положение «2», тумблер $S2$). Величина сопротивления R_3 изменяется с помощью переключателя « R_3 , кОм». Сопротивление R_3 подключается к контуру при измерении входного сопротивления детектора. Переключатель $S3$ позволяет изменять сопротивление нагрузки детектора. Напряжение на входе детектора измеряется на гнезде Г5. Выходное напряжение снимается с гнезда Г6.

2.4. Порядок выполнения работы

2.4.1. Снятие статической характеристики детектирования: $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх0}})$

2.4.1.1. Подключить генератор ВЧ колебаний (выход 0,1...1В) к гнезду Г4, вольтметр к гнезду Г6. Установить тумблер $S2$ в положение «1», переключатель $S3$ — в положение «1».

2.4.1.2. Установить на выходе генератора ВЧ колебание с параметрами: несущая частота f_0 (произвольно); амплитуда несущего колебания (произвольно) частота модуляции $F = 400$ Гц; коэффициент амплитудной модуляции $M, \% = 30$.

2.4.1.3. Изменяя частоту генератора ВЧ, добиться максимальных показаний вольтметра, что соответствует настройке контура в резонанс.

2.4.1.4. Снять зависимость действующего значения выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ от действующего значения несущего колебания $U_{\text{вх0}}$, изменяя напряжение на входе детектора с помощью выходного аттенюатора генератора ВЧ и измеряя вольтметром напряжение на гнездах Г6 и Г5 соответственно.

2.4.1.5. Установить переключатель $S3$ в положение «2» и повторить пункт 2.4.1.4.

2.4.1.6. Установить переключатель $S3$ в положение «3» и повторить пункт 2.4.1.4.

2.4.2. Снятие динамической характеристики детектирования: $U_{\text{вых}} = f(M)$

2.4.2.1. Подключить вольтметр к гнезду Г5 и с помощью аттенюатора генератора ВЧ установить на входе детектора $U_{\text{вх0}} \approx 1$ В.

2.4.2.2. Подключить вольтметр к гнезду Г6 и снять зависимость действующего напряжения на выходе детектора $U_{\text{вых}}$ от коэффициента амплитудной модуляции M радиосигнала на его входе для трёх положений переключателя $S3$.

2.4.3. Исследование формы выходного напряжения и напряжения на диоде

2.4.3.1. Установить глубину модуляции входного сигнала $M, \% = 30$.

2.4.3.2. Зарисовать осциллограммы входного напряжения $u_{\text{вх}}(t)$ (гнездо Г5), выходного напряжения $u_{\text{вых}}(t)$ (гнездо Г6) и напряжения на диоде $u_{\text{д}}(t)$ (между гнездами Г5 и Г6) для трёх значений величины сопротивления нагрузки R .

2.4.4. Измерение входного сопротивления амплитудного детектора $R_{\text{вх}}$

Измерения произвести методом замещения для трёх значений сопротивлений нагрузки R .

2.4.4.1. Установить на входе детектора (гнездо Г5) немодулированное ВЧ

напряжение с действующим значением $U_{\text{вх}0} = 1 \text{ В}$.

2.4.4.2. Подключить эквивалент входного сопротивления детектора, переведя тумблер $S2$ в положение «2».

2.4.4.3. Подобрать величину R_3 , с помощью переключателя « R_3 » так, чтобы напряжение на гнездах Г5 было бы равно первоначальному значению $U_{\text{вх}0} = 1 \text{ В}$. Это значение и будет равно $R_{\text{вх}}$.

2.5. Оформление отчета

2.5.1. Сформулировать цель работы.

2.5.2. Привести принципиальную схему макета.

2.5.3. Привести результаты экспериментальных исследований: статическую характеристику при различных сопротивлениях нагрузки; динамическую характеристику при различных сопротивлениях нагрузки; результаты измерения входного сопротивления детектора.

2.5.4. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений, а также напряжения на диоде при различных параметрах нагрузки в едином временном и амплитудном масштабах.

2.6. Выводы

В выводах необходимо отразить следующее:

— на основании анализа статической детекторной характеристики выявить области квадратичного и линейного детектирования;

— сделать заключение о степени линейности динамической детекторной характеристики;

— сравнить результаты измерения входного сопротивления с формулой (2.13) и оценить степень соответствия теории и эксперимента;

— сделать выводы о влиянии постоянной времени ФНЧ на качество детектирования.

2.7. Контрольные вопросы

2.7.1. Чем определяется режим работы диодного детектора?

2.7.2. Почему принято разделять детектирование сильных и слабых сигналов?

2.7.3. Приведите принципиальную схему последовательного диодного детектора, поясните назначение всех элементов схемы.

2.7.4. Какими соображениями следует руководствоваться при выборе параметров фильтра нижних частот диодного детектора?

2.7.5. От чего зависит угол отсечки тока, протекающего через диод в режиме линейного детектирования?

2.7.6. От чего зависит входное сопротивление амплитудного детектора?

2.7.7. Дайте определение статической и динамической детекторных характеристик.

2.7.8. Какими причинами обусловлено появление нелинейных искажений на выходе детектора АМ сигналов?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ СМЕЩЕНИЕМ

3.1. Цель работы

Изучение процесса получения амплитудно-модулированных колебаний и исследование физических процессов при амплитудной модуляции смещением.

3.2. Теоретическая часть

3.2.1. Амплитудный модулятор

Амплитудным модулятором называется устройство, формирующее на выходных зажимах высокочастотный сигнал, амплитуда которого $E_m(t)$ изменяется прямопропорционально модулирующему сигналу (передаваемому сообщению). Напряжение на выходе амплитудного модулятора можно представить в виде [1]:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = E_m(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0), \quad (3.1)$$

где $E_m(t)$ — огибающая радиосигнала, которая несет информацию; ω_0 — частота несущего колебания; θ_0 — начальная фаза несущего колебания.

При тональной АМ выражение (3.1) преобразуется к виду [1, 3]:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = E_{m0} [1 + M \cos(\Omega t + \nu)] \cos(\omega_0 t + \theta_0), \quad (3.2)$$

где E_{m0} — амплитуда несущего колебания; M — коэффициент амплитудной модуляции ($M \leq 1$); Ω и ν — частота и начальная фаза модулирующего колебания.

Простейший амплитудный модулятор (рис. 3.1.) строится на основе нелинейного резонансного усилителя (настраивается на несущую частоту), коэффициентом усиления которого управляет модулирующий сигнал. Известно [1, 2], что коэффициент усиления нелинейного резонансного усилителя зависит от напряжения смещения на транзисторе. Поэтому если модулирующий сигнал будет управлять напряжением смещения транзистора, то это приведет к амплитудной модуляции.

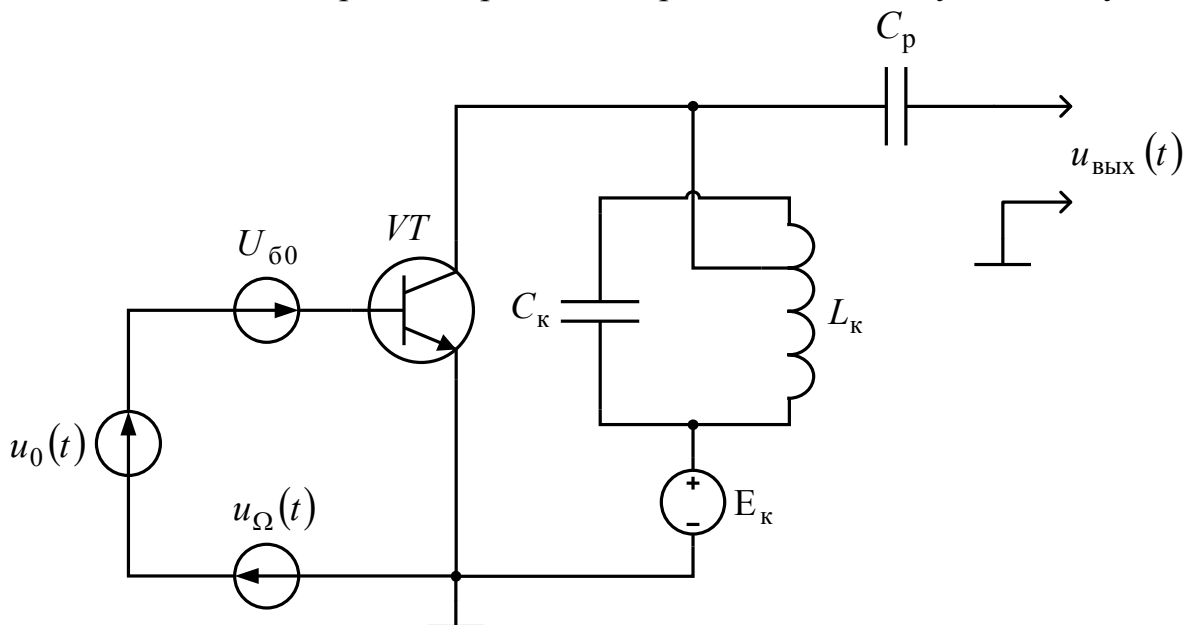


Рис. 3.1 — Упрощенная принципиальная схема амплитудного модулятора

На вход каскада подается сумма из трех напряжений: постоянного напряжения смещения $U_{\text{б}0}$; модулирующего сигнала $u_{\Omega}(t)$ и несущего колебания $u_0(t)$. В случае тональной модуляции можно записать (для удобства положим $\theta_0, \nu = 0$):

$$u_{\text{б}3}(t) = U_{\text{б}0} + U_{m\Omega} \cos(\Omega t) + E_{m0} \cos(\omega_0 t), \quad (3.3)$$

где $U_{m\Omega}$ — амплитуда модулирующего колебания.

Принцип работы такого модулятора поясняется диаграммами напряжений и токов, показанными на рис. 3.2.

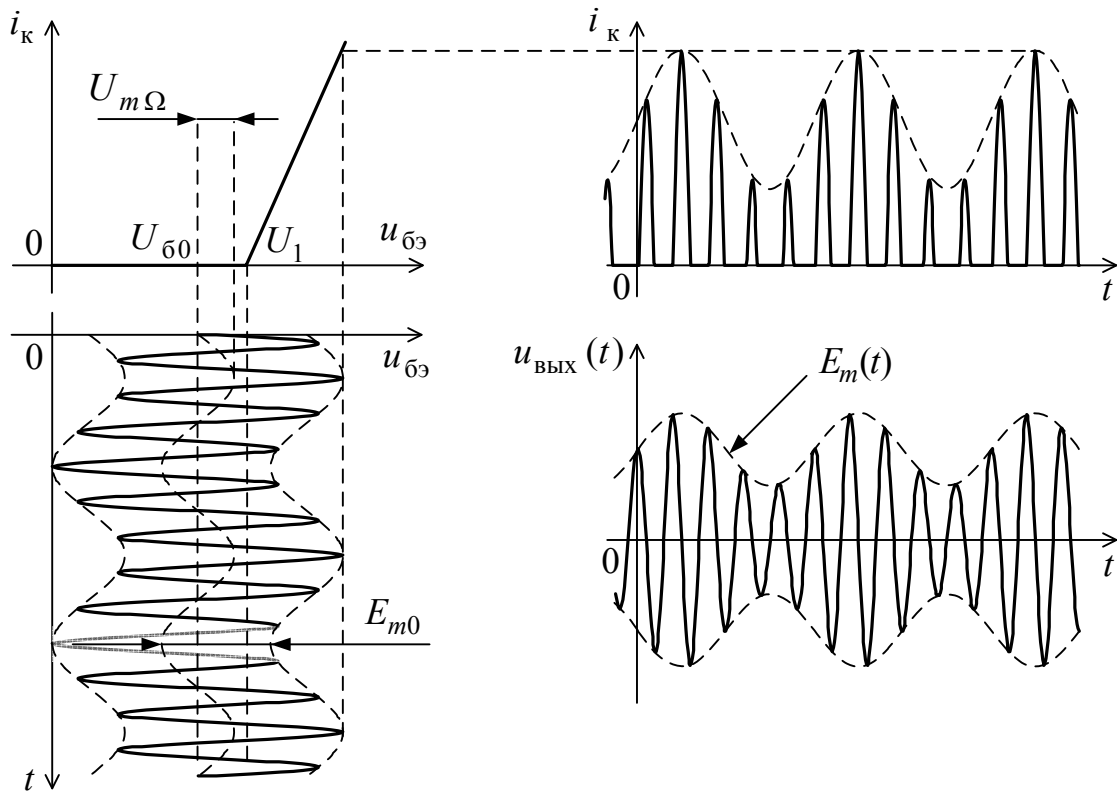


Рис. 3.2 — Диаграммы работы амплитудного модулятора

ВАХ транзистора аппроксимирована кусочно-линейным способом. Начальное смещение $U_{\text{б}0}$ и амплитуда несущего колебания E_{m0} выбираются так, чтобы обеспечить режим работы с отсечкой тока. За счет того, что рабочая точка перемещается синхронно с низкочастотным модулирующим колебанием, происходит изменение амплитуды импульсов коллекторного тока, и, следовательно, изменение амплитуды первой гармоники коллекторного тока, что приводит к модуляции амплитуды выходного напряжения.

При амплитудной модуляции смещением неизбежны искажения: форма огибающей выходного напряжения $E_m(t)$ отличается от формы модулирующего напряжения. Связано это с нелинейной зависимостью амплитуды первой гармоники коллекторного тока I_{k1} от напряжения смещения. Модуляция смещением по этой причине применяется для получения АМ колебаний с коэффициентом модуляции не более $(30 \dots 40) \%$ ($M \leq 0,3 \dots 0,4$).

Качество работы модулятора можно оценить по виду статической и динамической модуляционных характеристик.

Статическая модуляционная характеристика — это зависимость амплитуды $U_{m\text{вых}}$ (либо действующего значения $U_{\text{вых}}$) напряжения на выходе модулятора от модулирующего фактора (напряжения смещения U_{60}) при неизменной амплитуде несущего колебания $E_{m0} = \text{const}$. Статическую модуляционную характеристику снимают в отсутствии модулирующего сигнала ($U_{m\Omega} = 0$). Используют ее для выбора начального смещения на транзисторе модулятора. Это смещение выбирают так, чтобы оно соответствовало середине линейного участка статической модуляционной характеристики.

Динамическая модуляционная характеристика представляет собой зависимость коэффициента амплитудной модуляции M выходного сигнала модулятора от амплитуды $U_{m\Omega}$ (либо действующего значения U_{Ω}) модулирующего напряжения. В идеальном случае эта характеристика должна быть линейной. Степень нелинейности этой характеристики определяет величину искажений при модуляции.

3.3. Описание лабораторной установки

Принципиальная схема лабораторного макета в режиме исследования амплитудной модуляции приведена на рис. 3.3. Напряжение смещения U_{60} измеряется вольтметром, расположенным на базовом блоке питания, со шкалой 2 В. Регулируется напряжение смещение с помощью потенциометра «Смещение».

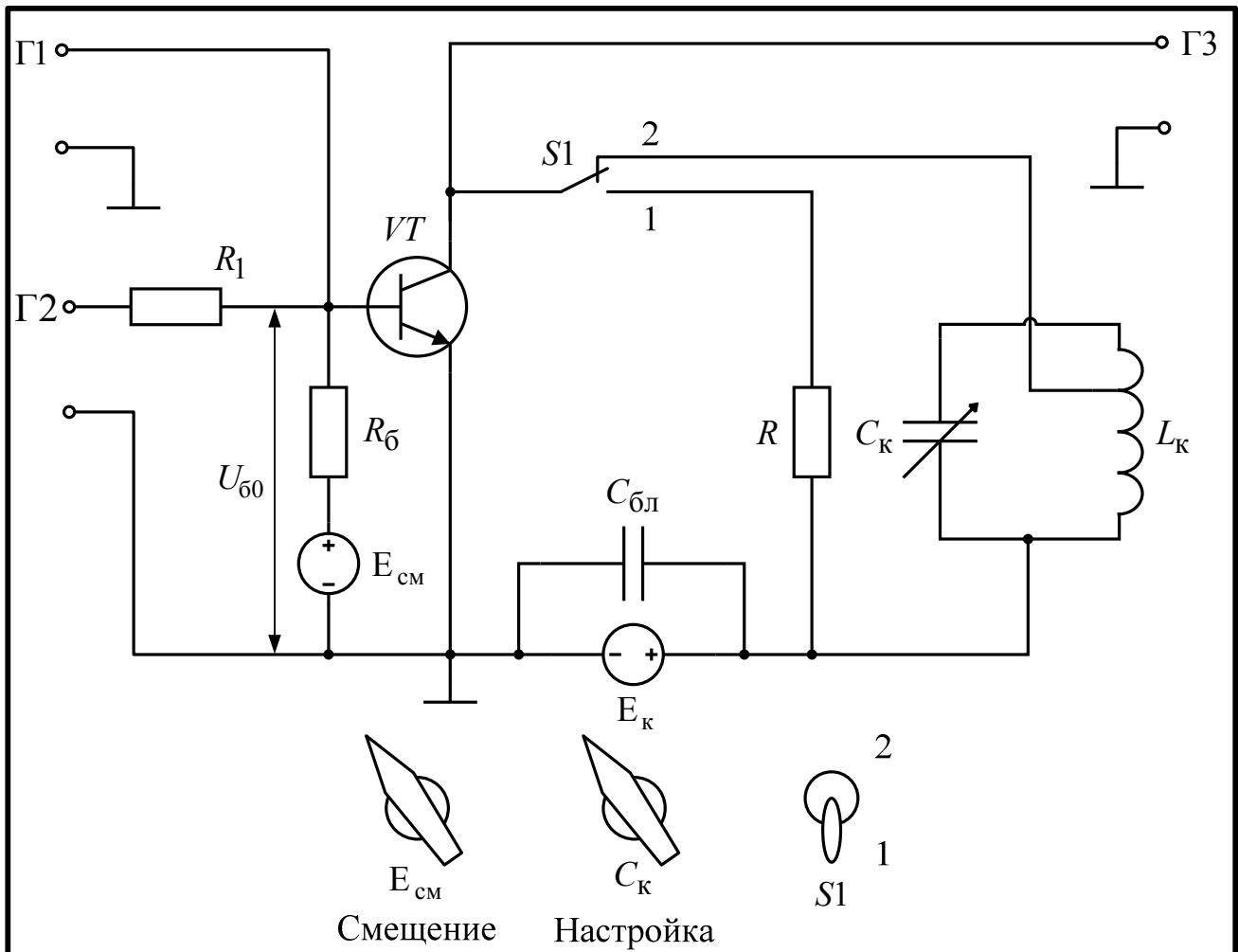


Рис. 3.3 — Принципиальная схема лабораторного макета

Высокочастотное напряжение следует подавать на гнездо Г1, низкочастотное напряжение — на гнездо Г2. Промодулированное колебание снимается с гнезда Г3 (выход). Переключатель $S1$ позволяет подключить резистор R в цепь коллектора.

3.4. Порядок выполнения работы

3.4.1. Сборка и настройка экспериментального стенда

3.4.1.1. Включить в сеть лабораторную установку, генератор НЧ, генератор ВЧ и вольтметр переменного тока.

3.4.1.2. Выход генератора ВЧ подключить к гнезду Г1.

3.4.1.3. Выход генератора НЧ подключить к гнезду Г2. Выбрать диапазон «3 В» и установить напряжение на выходе генератора НЧ, равное нулю ($U_{m\Omega} = 0$), что соответствует отсутствию модуляции.

3.4.1.4. Осциллограф подключить к выходному гнезду Г3.

3.4.1.5. Повернуть ручку «Настройка» на панели по часовой стрелке до упора.

3.4.1.6. Тумблер $S1$ на панели макета установить в положение 2 (контур).

3.4.1.7. Настроить установку. Для этого:

— подключить вольтметр к гнезду Г1 и установить на выходе генератора ВЧ напряжение (100...200) мВ с помощью внутреннего аттенюатора этого генератора;

— перестраивая частоту генератора ВЧ, добиться резонанса и записать значение резонансной частоты (резонанс наблюдать на экране осциллографа).

3.4.2. Снятие статических модуляционных характеристик усилителя

3.4.2.1. Снять статическую модуляционную характеристику при амплитуде несущего колебания $E_{m0} = 0,7$ В, что соответствует действующему значению $E_0 = 0,5$ В. Для этого:

— подключить вольтметр к гнезду Г1 и установить с помощью аттенюатора генератора ВЧ действующее напряжение несущего колебания $E_0 = 0,5$ В;

— подключить вольтметр к выходному гнезду Г3 и проверить наличие резонанса, при необходимости подстроить частоту генератора ВЧ;

— изменяя напряжение смещения с помощью потенциометра «Смещение», снять зависимость действующего напряжения на выходе $U_{\text{вых}}$ от напряжения смещения U_{60} . Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 — Статическая модуляционная характеристика: $E_{m0} =$.

U_{60} , В								
$U_{\text{вых}}$, В								

3.4.2.2. Снять статическую модуляционную характеристику при амплитуде несущего колебания $E_{m0} = 0,4$ В, что соответствует действующему значению $E_0 = 0,3$ В. Для этого:

— подключить вольтметр к гнезду Г1 и установить с помощью аттенюатора генератора ВЧ действующее напряжение несущего колебания $E_0 = 0,3$ В.

— подключить вольтметр к гнезду Г3 и повторить действия п. 3.4.2.1.

3.4.2.3. Построить статические модуляционные характеристики для $E_{m0} = 0,7$ В и $E_{m0} = 0,4$ В.

3.4.3. Снятие динамических модуляционных характеристик

3.4.3.1. Установить частоту генератора НЧ (частоту модулирующего колебания) $F = 1$ кГц.

3.4.3.2. Снять динамическую модуляционную характеристику при амплитуде несущего колебания $E_{m0} = 0,7$ В, что соответствует действующему значению $E_0 = 0,5$ В. Для этого:

— подключить вольтметр к гнезду Г1 и установить с помощью аттенюатора генератора ВЧ напряжение несущего колебания $E_0 = 0,5$ В;

— установить напряжение начального смещения U_{60} , определяя его по соответствующей статической модуляционной характеристике (середина линейного участка);

— подключить вольтметр к гнезду Г2, а осциллограф к гнезду Г3. Постепенно увеличивая низкочастотное напряжение U_{Ω} (гнездо Г2), наблюдать процесс амплитудной модуляции по осциллографу;

— зафиксировать действующее напряжение U_{Ω}^* , соответствующее моменту появления существенных искажений огибающей;

— изменяя напряжение низкочастотного сигнала от 0 до U_{Ω}^* , снять зависимость коэффициента амплитудной модуляции от действующего значения модулирующего напряжения $M(U_{\Omega})$. Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Примечание:

коэффициент амплитудной модуляции измерять по осциллограмме выходного напряжения (гнездо Г3). Методика измерения иллюстрируется на рис. 3.4.

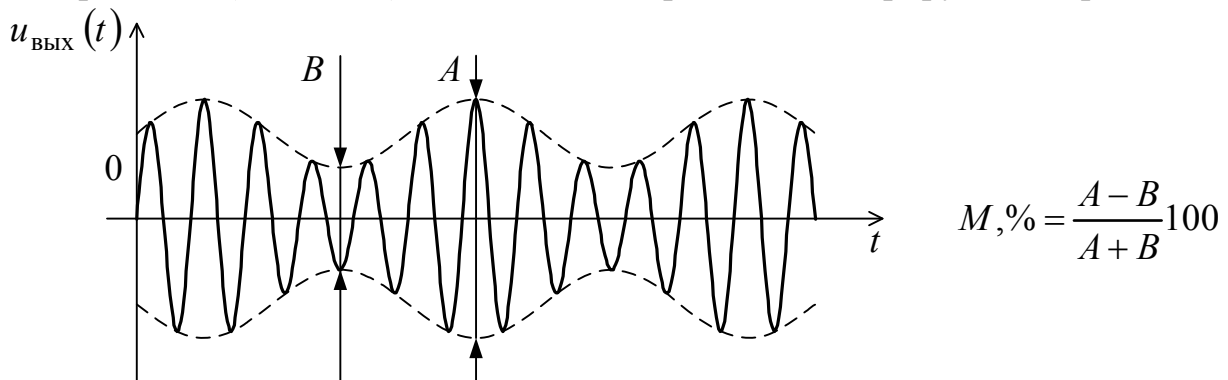


Рис. 3.4 — Методика измерения коэффициента модуляции

3.4.3.3. Снять динамическую модуляционную характеристику при амплитуде несущего колебания $E_{m0} = 0,4$ В, что соответствует действующему значению $E_0 = 0,3$ В, повторив действия п. 3.4.3.2.

Таблица 3.2 — Динамическая модуляционная характеристика:

$E_{m0} =$; $U_{60} =$.

U_{Ω} , В								
A , дел								
B , дел								
M , %								

3.4.4. Снятие осциллограмм выходного напряжения и коллекторного тока

3.4.4.1. Получить на экране осциллографа, подключенного к гнезду ГЗ осциллограмму АМ сигнала и зарисовать ее (тумблер $S1$ в положении «2» (контур)).

3.4.4.2. Перевести тумблер $S1$ в положение «1» (резистор) и зарисовать осциллограмму коллекторного тока.

3.5. Оформление отчета

3.5.1. Сформулировать цель работы.

3.5.2. Изложить принцип построения амплитудного модулятора и привести его принципиальную схему.

3.5.3. Привести таблицу 3.1 для двух значений амплитуды несущего колебания и графики статических модуляционных характеристик с иллюстрацией выбора рабочей точки.

3.5.4. Привести таблицу 3.2 для двух значений амплитуды несущего колебания и графики динамических модуляционных характеристик.

3.5.5. Привести осциллограммы коллекторного тока $i_k(t)$ и выходного напряжения $u_{\text{вых}}(t)$ в одном временном масштабе друг под другом.

3.6. Выводы

В выводах необходимо отразить следующее:

- описать вид статической и динамической модуляционных характеристик;
- пояснить, как следует выбирать начальное смещение на транзисторе резонансного усилителя;
- объяснить расхождение теоретических и экспериментальных данных.

3.7. Контрольные вопросы

3.7.1. Изобразите принципиальную схему амплитудного модулятора и поясните назначение всех элементов схемы.

3.7.2. Поясните физические процессы при модуляции смещением. Приведите временные диаграммы, иллюстрирующие получение АМ колебаний в транзисторном усилителе с модуляцией смещением.

3.7.3. Почему режим работы резонансного усилителя для получения АМ колебаний должен быть нелинейным?

3.7.4. Дайте определение статической и динамической модуляционных характеристик.

3.7.5. Чем следует руководствоваться при выборе начального напряжения смещения транзистора модулятора?

3.7.6. Каковы недостатки модуляции смещением и чем они вызваны?

3.7.7. Как влияет на форму АМ колебания увеличение напряжения смещения?

3.7.8. Как изменяется коэффициент модуляции и качество воспроизведения огибающей с увеличением амплитуды высокочастотного колебания?

3.7.9. Можно ли получить хорошее качество АМ колебания при апериодической нагрузке усилителя?

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ *LC*-АВТОГЕНЕРАТОРА ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

4.1. Цель работы

Исследование стационарного режима работы, мягкого и жесткого режимов самовозбуждения и захвата частоты автогенератора.

4.2. Теоретическая часть

4.2.1. Принцип действия *LC*-автогенератора гармонических колебаний

Автогенератор представляет собой нелинейное устройство, преобразующее энергию источника питания в энергию колебаний. Структурная схема автогенератора гармонических колебаний (рис. 4.1) содержит резонансный усилитель и цепь положительной обратной связи (ПОС).



Рис. 4.1 — Структурная схема *LC*-автогенератора

Комплексный коэффициент передачи нелинейного резонансного усилителя по первой гармонике

$$K_y(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}} = K_y(\omega) e^{j\varphi_y(\omega)}. \quad (4.1)$$

Комплексный коэффициент передачи четырехполюсника обратной связи

$$K_{\text{ос}}(j\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{ос}}}{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}} = K_{\text{ос}}(\omega) e^{j\varphi_{\text{ос}}(\omega)}. \quad (4.2)$$

Автогенератор, находящийся в стационарном режиме, можно рассматривать как нелинейный усилитель, на вход которого подается колебание, вырабатываемое в самом генераторе. Колебания с выхода усилителя подаются на его вход по цепи обратной связи. Частота и амплитуда автоколебания в стационарном режиме определяются только параметрами самого генератора.

В момент запуска в колебательной цепи автогенератора возникают свободные колебания, обусловленные включением источника питания (переходной процесс) и электрическими флуктуациями (шумами). Благодаря положительной обратной связи (ПОС) начальные колебания усиливаются. Пока амплитуда мала, усиление прак-

тически линейно. Энергетически процесс нарастания амплитуд объясняется тем, что за один период колебания усилитель передает в нагрузку энергию, большую той, которая расходуется в ней за это время. С ростом амплитуды начинает проявляться нелинейность устройства и усиление уменьшается. Нарастание амплитуды прекращается, когда усиление уменьшается до уровня, при котором только компенсируется затухание колебаний в нагрузке. При этом энергия, отдаваемая за один период источником питания равна энергии, расходуемой за это же время в нагрузке (наступает стационарный режим).

В стационарном режиме соблюдаются следующие соотношения:

$$K_y(\omega_r, U_{вх})K_{ос}(\omega_r) = 1; \quad (4.3)$$

$$\phi_y(\omega_r) + \phi_{ос}(\omega_r) = 2\pi n, \quad (4.4)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Условие (4.3) называют условием баланса амплитуд. Из него следует, что в стационарном режиме кольцевое усиление на генерируемой частоте равно единице.

Условие (4.4) называют условием баланса фаз. Из него следует, что в стационарном режиме полный фазовый сдвиг в кольце кратен 2π , т.е. обратная связь должна быть чисто положительной.

4.2.2. Мягкий режим самовозбуждения

Режим самовозбуждения автогенератора зависит от начального смещения на нелинейном элементе, т.е. от вида колебательной характеристики. Рассмотрим схему автогенератора с трансформаторной обратной связью (рис. 4.2).

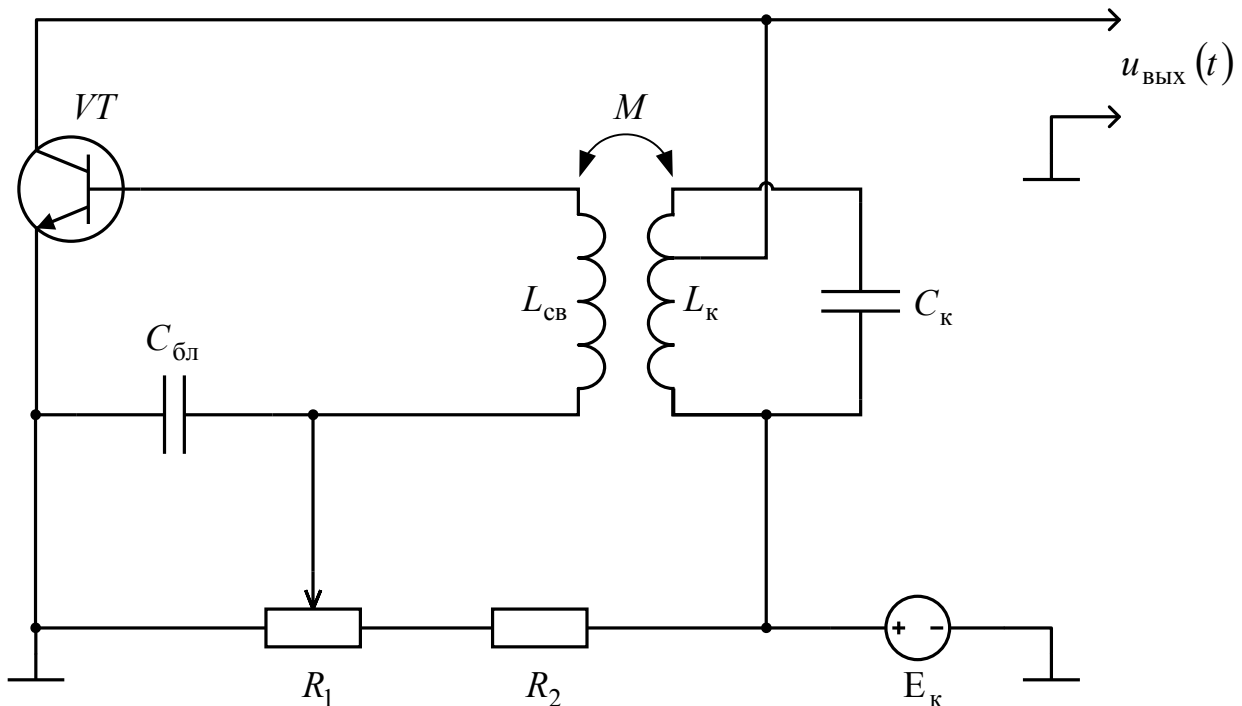


Рис. 4.2 — Принципиальная схема LC -автогенератора с трансформаторной обратной связью

Для получения мягкого режима самовозбуждения автогенератора необходимо выбирать начальное смещение на линейном участке ВАХ транзистора. В этом слу-

чае при увеличении взаимной индуктивности M , начиная с критического значения $M_{кр}$, амплитуда колебания $U_{вых\ m\ ст}$ будет плавно (мягко) возрастать, как показано на рис. 4.3. Стрелками обозначено направление изменения M . Прямой и обратный ход этой характеристики совпадают. Срыв колебаний наблюдается при том же значении $M = M_{кр}$.

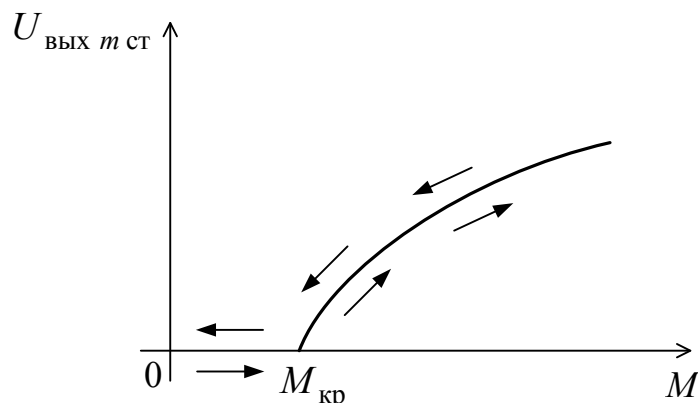


Рис. 4.3 — Иллюстрация мягкого режима самовозбуждения

4.2.3. Жесткий режим самовозбуждения

Жесткий режим самовозбуждения возникает при начальном смещении незначительно превышающем напряжение отсечки. Для возникновения колебаний в этом случае требуется более глубокая обратная связь ($M_{1кр}$), нежели при мягком самовозбуждении. После установления колебаний, связь можно ослабить. При дальнейшем уменьшении связи происходит срыв автоколебаний ($M_{2кр}$). Зависимость амплитуды выходного напряжения от M при этом показана на рис. 4.4. Стрелками обозначено направление изменения M .

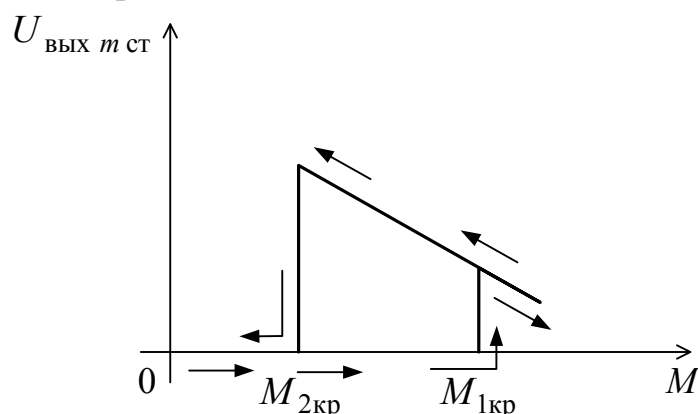


Рис. 4.4 — Иллюстрация жесткого режима самовозбуждения

Прямой и обратный ход этой характеристики не совпадают. Возникновение и срыв колебаний происходит скачком (жестко).

4.2.4. Захват частоты

Поведение автогенератора, находящегося под действием внешней ЭДС, существенно зависит от амплитуды и частоты этой ЭДС.

Если частота внешнего воздействия ω_c приближается к частоте генерации

$\omega_{Г0} = \omega_p$ (ω_p — резонансная частота колебательной системы генератора), то при некотором значении разности $(\omega_c - \omega_p)$, автогенератор начинает работать точно на частоте $\omega_{Г} = \omega_c$. Частота генератора оказывается, захваченной частотой внешней ЭДС (принудительная синхронизация).

Ширина полосы захвата $\Delta\omega$ пропорциональна отношению амплитуды внешнего воздействия E_c к амплитуде автоколебаний на базе транзистора в стационарном режиме $U_{бмст}$ и обратнопропорциональна добротности Q колебательной системы автогенератора [1]:

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_p} \approx \frac{E_c}{U_{бмст} Q}. \quad (4.5)$$

4.3. Описание лабораторной установки

Упрощенная схема лабораторного макета изображена на рис. 4.5.

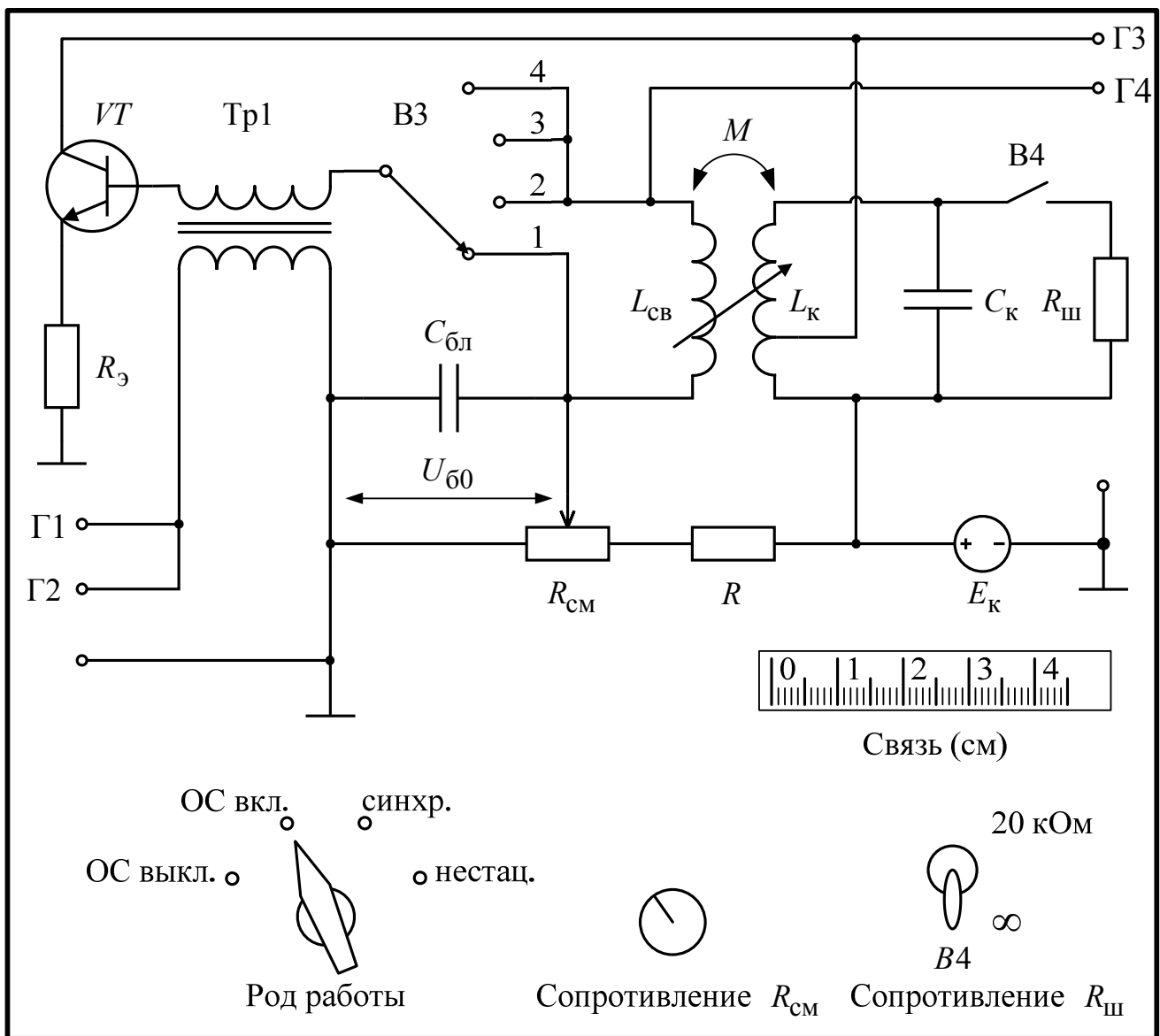


Рис. 4.5 — Принципиальная схема лабораторного макета

В состав лабораторного макета входит транзисторный LC -автогенератор с трансформаторной обратной связью и ряд вспомогательных узлов, позволяющих исследовать работу автогенератора. Необходимые для этого коммутации осуществляются переключателем «Род работы» ВЗ, имеющим 4 положения: 1 — «ОС выкл.»; 2 — «ОС вкл.», 3 — «Синхронизация», 4 — «Нестационарный». При разомкнутой обратной связи (положение 1) можно снимать колебательную характеристику усилителя, поскольку размыкание цепи обратной связи не изменяет режим работы схемы. В положении «2» может быть проведено исследование автогенератора в стационарном режиме. В положении «3» можно исследовать автогенератор при внешнем воздействии, которое подается через вспомогательный трансформатор Тр1 с коэффициентом трансформации, близким к единице.

Ручкой «Смещение» можно плавно изменять напряжение смещения U_{60} , которое измеряется вольтметром базового блока со шкалой 2 В.

Изменение величины коэффициента обратной связи осуществляется за счет перемещения катушки контура $L_{св}$ с помощью штурвала, размещенного в торцевой части корпуса макета. С помощью тумблера «Сопротивление $R_{ш}$ » параллельно колебательному контуру можно подключить шунтирующее сопротивление, что уменьшает добротность.

Гнездо Г1 используется для подключения внешнего сигнала, гнездо Г2 — для измерения действующего значения этого сигнала с помощью внешнего вольтметра. С гнезд Г3 и Г4 снимаются переменное напряжение с коллектора транзистора и напряжение обратной связи, соответственно.

4.4. Порядок выполнения работы

4.4.1. Экспериментальное определение коэффициентов обратной связи, соответствующих различным расстояниям между катушками

4.4.1.1. Собрать схему исследования. Для этого установить переключатель «Род работы» ВЗ в положение 1 — «ОС выкл.». Подключить к гнезду Г1 генератор ВЧ, а к гнезду Г2 — вольтметр. Изменяя напряжение на выходе генератора ВЧ, установить на базе транзистора (гнездо Г2) действующее значение напряжения $U_6 = 100$ мВ. Вращая потенциометр $R_{см}$, установить напряжение смещения на базе $U_{60} = 0,8$ В.

4.4.1.2. Подключить вольтметр к гнезду Г3 и, изменяя частоту генератора ВЧ, добиться максимальных показаний внешнего вольтметра (резонанс). Изменяя уровень выходного сигнала генератора ВЧ, установить на контуре $U_k = 1$ В.

4.4.1.3. Для измерения напряжения обратной связи $U_{ос}$ вольтметр подключить к гнезду Г4.

4.4.1.4. Снять зависимость напряжения $U_{ос}$ от расстояния l между катушками, поддерживая напряжение на контуре (гнездо Г3) $U_k = 1$ В. При этом $K_{ос}$ будет численно равен напряжению обратной связи $U_{ос}$. Построить график зависимости $K_{ос} = f(l)$.

4.4.2. Экспериментальное определение зависимости амплитуды генерируемых колебаний от коэффициента обратной связи

Снять зависимости амплитуды генерируемых колебаний от коэффициента обратной связи при $U_{60} = 0,8; 0,6; 0,4 \text{ В}$.

4.4.2.1. Перевести переключатель «Род работы» ВЗ в положение 2 — «ОС вкл.», подключить вольтметр к гнезду ГЗ.

4.4.2.2. Снять зависимость действующего значения генерируемого колебания от расстояния между катушками $U_r = f(l)$, измеряя напряжение на контуре (гнездо ГЗ) при изменении расстояния между катушками.

При этом следует зафиксировать расстояния, соответствующие возникновению и срыву колебаний в автогенераторе (эти расстояния соответствуют критическим значениям коэффициента обратной связи $K_{оскр}$).

Если при максимальном коэффициенте обратной связи автогенератор не возбуждается, следует добиться возникновения колебаний, меняя напряжение смещения, а затем установить требуемое смещение и снять зависимость $U_r = f(l)$.

4.4.2.3. Построить зависимости $U_r = f(K_{ос})$, пользуясь графиком $K_{ос}(l)$, полученным в п. 4.4.1.4, и определить значения $K_{оскр}$ при различных напряжениях смещения.

4.4.3. Исследование действия внешней гармонической ЭДС на автогенератор

Исследовать действие внешней гармонической ЭДС на автогенератор при $E_c = 0,2U_6$; $E_c = 0,4U_6$; $E_c = 0,6U_6$; $E_c = 0,8U_6$.

4.4.3.1. Перевести переключатель ВЗ «Род работы» в положение 3 «Синхронизация». Подключить вольтметр к гнезду Г2 для контроля напряжения на базе. Осциллограф подключить к гнезду ГЗ.

4.4.3.2. Установить $U_{60} = 0,6 \text{ В}$ и $K_{ос} = 1,5K_{оскр}$ при $E_c = 0$. Измерить напряжение на базе транзистора U_6 (гнездо Г2).

4.4.3.3. Последовательно установить на выходе генератора ВЧ напряжения: $E_c = 0,2U_6$; $E_c = 0,4U_6$; $E_c = 0,6U_6$; $E_c = 0,8U_6$ и определить для каждого случая абсолютную полосу захвата. Для этого, изменяя частоту генератора ВЧ, по осциллограмме выходного напряжения (гнездо ГЗ) определить частоты, соответствующие границам полосы захвата. На границах полосы захвата имеет место режим бийений, что наблюдается на экране осциллографа.

4.4.3.4. Повторить пункты 4.4.3.1, 4.4.3.2, 4.4.3.3, зашунтировав контур автогенератора сопротивлением $R_{ш} = 20 \text{ кОм}$. После окончания исследования сопротивление шунта отключить.

4.5. Оформление отчета

4.5.1. Сформулировать цель работы.

4.5.2. Изобразить принципиальную схему лабораторного макета.

4.5.3. Привести результаты расчетов, графики, таблицы и осциллограммы, полученные при выполнении лабораторной работы.

4.6. Выводы

В выводах необходимо отразить следующее:

- как зависит коэффициент K_{oc} от расстояния между катушками;
- от чего зависит режим самовозбуждения (мягкий, жесткий) и каковы особенности этих режимов;
- от чего зависит полоса захвата.

4.7. Контрольные вопросы

4.7.1. Дайте определение колебательной характеристики усилителя.

4.7.2. Чем определяется режим самовозбуждения автогенератора?

4.7.3. Каковы условия стационарности?

4.7.4. Сформулируйте условие самовозбуждения автогенератора.

4.7.5. Чем определяется частота автоколебаний?

4.7.6. Охарактеризуйте особенности жесткого и мягкого режимов самовозбуждения.

4.7.7. Поясните, в чем проявляется эффект захвата частоты при внешнем воздействии на автогенератор.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ RC -АВТОГЕНЕРАТОРА ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

5.1. Цель работы

Исследование стационарного режима работы RC -автогенератора, явлений регенеративного усиления и захвата частоты.

5.2. Теоретическая часть

5.2.1. Принцип действия RC -автогенератора гармонических колебаний

Одной из распространенных схем RC -автогенератора является схема на базе неинвертирующего усилителя с мостом Вина в цепи обратной связи (рис. 5.1).

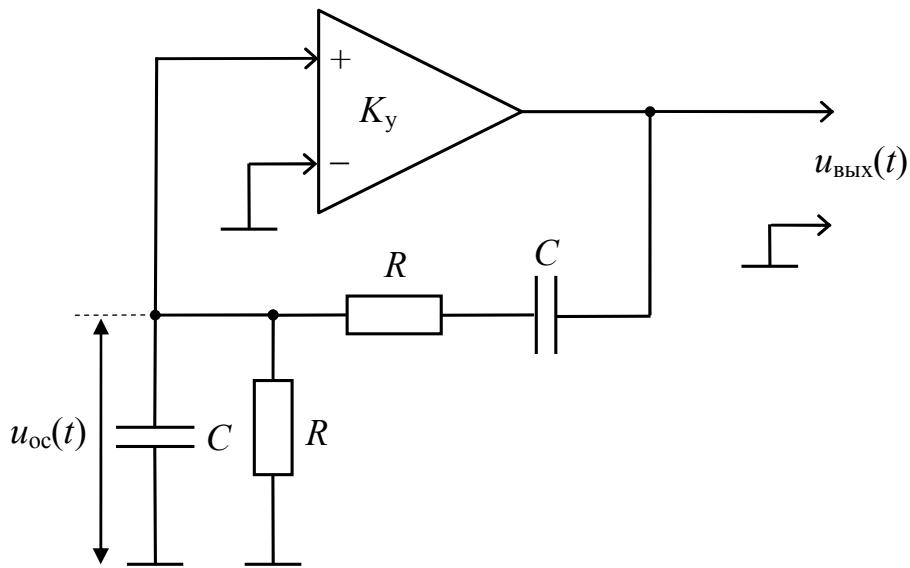


Рис. 5.1 — Схема RC -автогенератора с мостом Вина в цепи ОС

В данной схеме неинвертирующий усилитель в широкой полосе частот имеет постоянный коэффициент передачи $K_y(\omega) = K_y = const$ и не вносит фазового сдвига $\varphi_y(\omega) = 0$. Поэтому частота генерации определяется только комплексным коэффициентом передачи цепи обратной связи [3]:

$$K_{oc}(j\omega) = \frac{1}{3 + j(\omega RC - 1/\omega RC)} = K_{oc}(\omega) e^{j\varphi_{oc}(\omega)}, \quad (5.1)$$

где

$$K_{oc}(\omega) = \frac{\omega RC}{\sqrt{9(\omega RC)^2 + [(\omega RC)^2 - 1]^2}} \quad \text{— АЧХ моста Вина;} \quad (5.2)$$

$$\varphi_{oc}(\omega) = \text{Arctg} \frac{1 - (\omega RC)^2}{3\omega RC} \quad \text{— ФЧХ моста Вина.} \quad (5.3)$$

На рис. 5.2 показаны частотные характеристики цепи обратной связи, из кото-

рых следует, что на частоте $\omega_0 = 1/RC$ коэффициент обратной связи максимален и равен $K_{oc}(\omega_0) = 1/3$, а фазовый сдвиг — $\varphi_{oc}(\omega_0) = 0$.

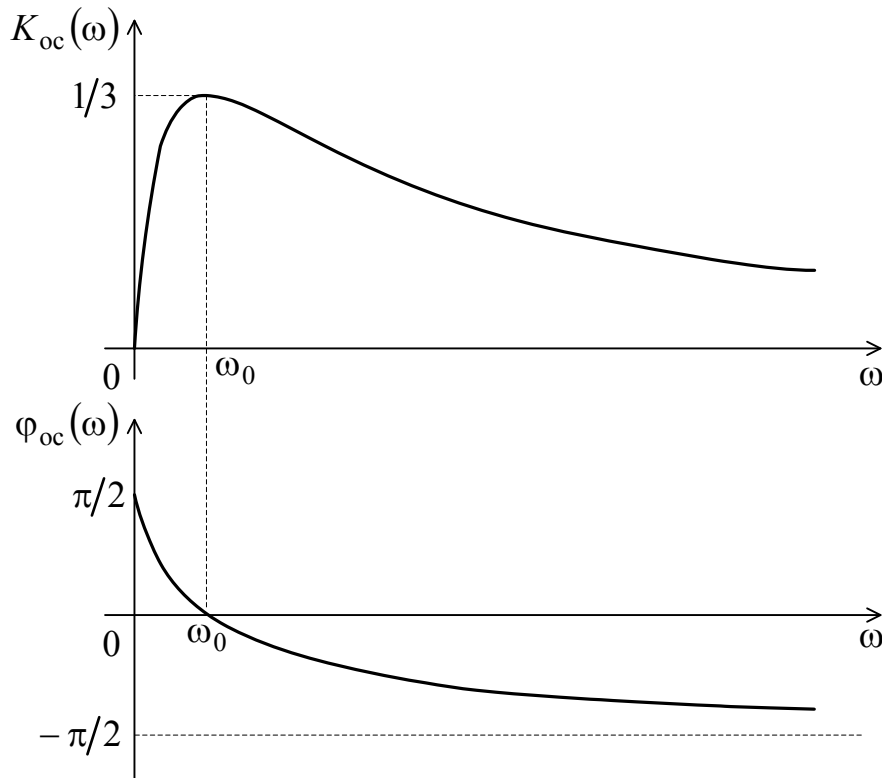


Рис. 5.2 — Частотные характеристики моста Вина

В стационарном режиме на частоте генерации ω_r выполняется условие баланса амплитуд

$$K_y(\omega_r)K_{oc}(\omega_r) = 1 \quad (5.4)$$

и условие баланса фаз

$$\varphi_y(\omega_r) + \varphi_{oc}(\omega_r) = 2\pi n, \quad (5.5)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Из условия баланса фаз рассчитаем частоту генерации автогенератора, изображенного на рис. 5.1. Поскольку в данной схеме $\varphi_y(\omega_r) = 0$, то из (5.5) следует, что достаточно (при $n = 0$), чтобы фазовый сдвиг в цепи обратной связи на частоте генерации обращался в нуль: $\varphi_{oc}(\omega_r) = 0$. Отсюда следует, что частота автоколебаний в рассматриваемой схеме равна

$$\omega_r = \omega_0 = 1/RC. \quad (5.6)$$

Условие самовозбуждения автогенератора имеет вид [1, 2]:

$$K_y(\omega_r)K_{oc}(\omega_r) > 1. \quad (5.7)$$

Поскольку для моста Вина $K_{oc}(\omega_r) = 1/3$, то условие (5.7) выполняется, если коэффициент усиления усилителя удовлетворяет условию

$$K_y > 3. \quad (5.8)$$

Для ограничения амплитуды колебаний при сохранении синусоидальной формы в усилитель введена отрицательная нелинейная обратная связь, глубина которой возрастает при увеличении амплитуды колебаний. Это обеспечивает переход в стационарный режим ранее, чем проявятся существенные нелинейные искажения.

5.2.2. Воздействие внешней ЭДС на цепь с ПОС

При воздействии на систему с положительной обратной связью, которая рассмотрена ранее, внешней гармонической ЭДС E_c (рис. 5.3) следует различать два случая: $K_y < 3$ и случай $K_y > 3$. В первом случае ($K_y < 3$) система представляет собой регенеративный усилитель (усилитель с положительной обратной связью).

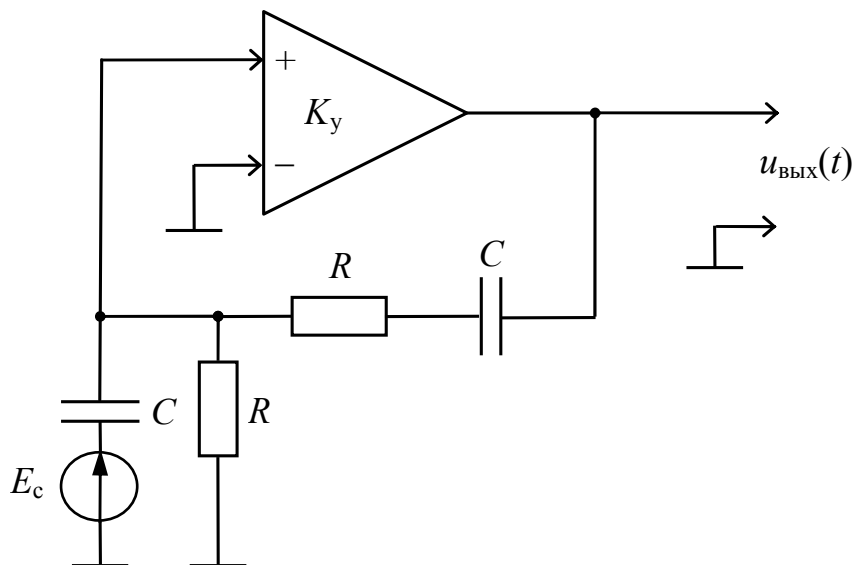


Рис. 5.3 — Воздействие внешней ЭДС на цепь с положительной обратной связью

Во втором случае ($K_y > 3$) это приводит к захвату частоты (принудительной синхронизации при) RC -генератора внешней ЭДС частотой ω_c . При приближении частоты ω_c внешней ЭДС к частоте генерации $\omega_r = \omega_0$, последняя принимает значение $\omega_r = \omega_c$ и остается равной этой частоте в некоторой полосе частот $\Delta\omega_3$ (см. рис. 5.4), называемой полосой захвата. Полоса захвата пропорциональна отношению амплитуды внешней ЭДС к амплитуде автоколебаний.

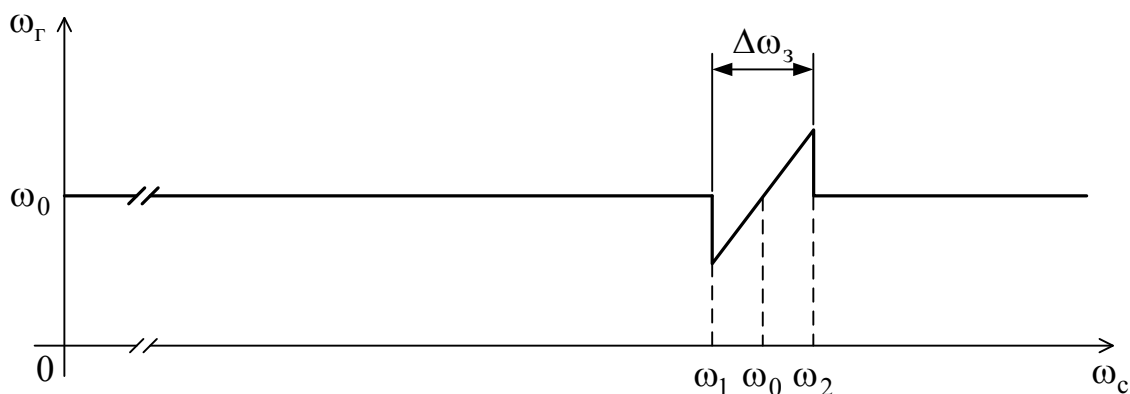


Рис. 5.4 — Иллюстрация эффекта захвата частоты

5.3. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из лабораторного макета RC -автогенератора и базового блока питания. На рис. 5.5 показана передняя панель макета.

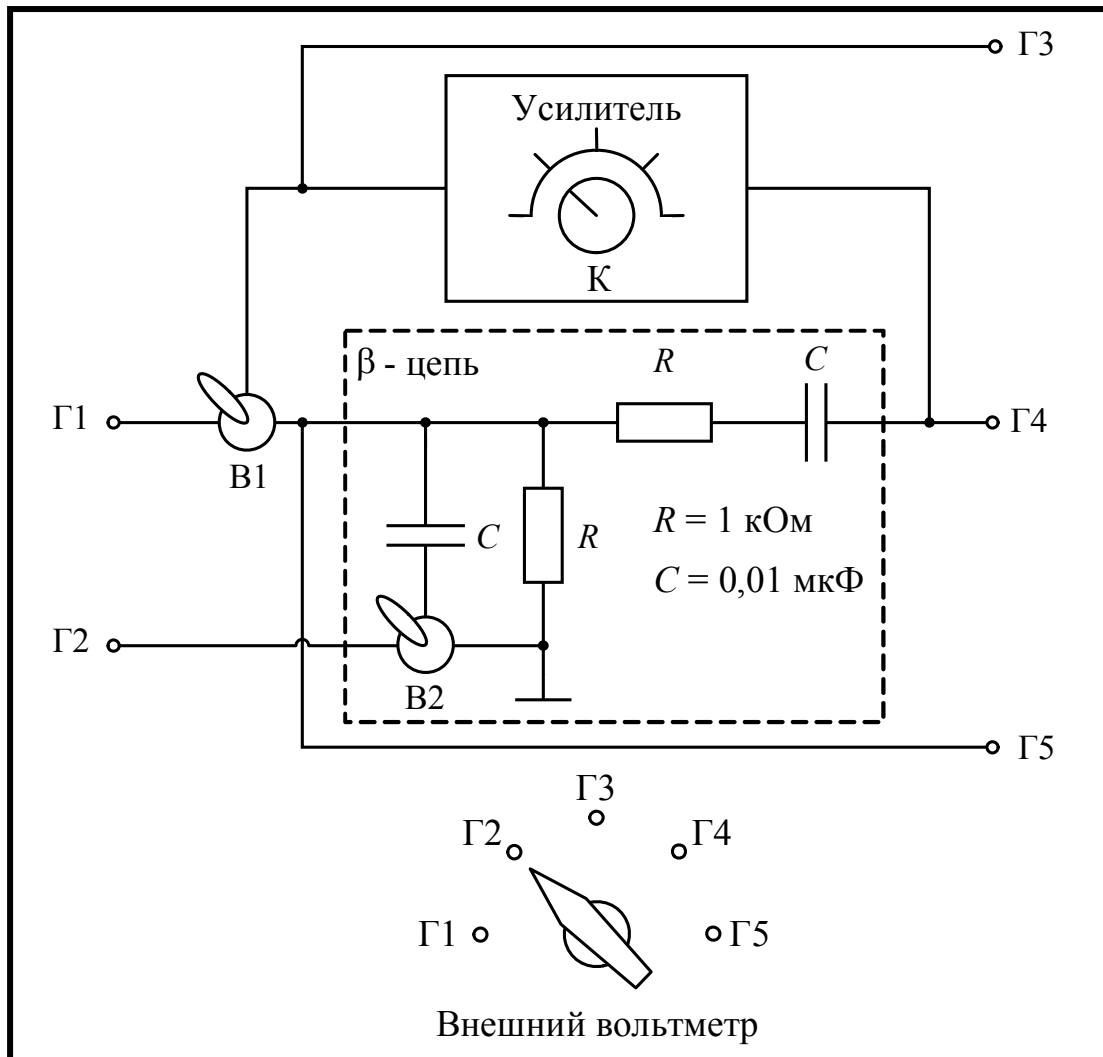


Рис. 5.5 — Передняя панель лабораторного макета

Потенциометр K_y служит для регулировки коэффициента усиления усилителя. Тумблер В1 позволяет разрывать цепь обратной связи и подключать вход усилителя к гнезду Г1. Тумблер В2 позволяет отключать конденсатор C от корпуса и подключать его к гнезду Г2, предназначенному для подачи внешней ЭДС в цепь обратной связи. Переключатель «Внешний вольтметр» позволяет выборочно подключать гнезда Г1...Г5 к гнезду Г6, расположенному на правой боковой стенке макета. К гнезду Г6 можно подключить внешний вольтметр или осциллограф.

5.4. Порядок выполнения работы

5.4.1. Предварительный расчет

Рассчитать частоту автоколебаний RC -генератора для заданных параметров лабораторного макета R , C (задаются преподавателем).

5.4.2. Исследование стационарного режима работы автогенератора

5.4.2.1. Снять и построить колебательную характеристику усилителя $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ при разомкнутой цепи обратной связи и $K_y > K_0 = 3$ на частоте $f_0 = 1/(2\pi RC)$. Для этого:

— собрать схему исследования, подключив макет RC -генератора к базовому блоку питания, НЧ генератор — к гнезду Г1, вольтметр — к гнезду Г4, вход СН1 осциллографа — также к гнезду Г4;

— разомкнуть цепь обратной связи RC -генератора, переведя тумблер В1 в левое положение и установить потенциометр К в крайнее положение, соответствующее максимальному усилению;

— изменяя входное напряжение (гнездо Г1) от 0 до 1 В через 100 мВ, измерить выходное напряжение (гнездо Г4). Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 — Колебательная характеристика усилителя

$U_{\text{ВХ}}, \text{В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$											

5.4.2.2. Снять и построить колебательную характеристику цепи обратной связи (прямую обратной связи) $U_{\text{ос}} = K_{\text{ос}} U_{\text{ВЫХ}}$ при разомкнутой цепи обратной связи и том же значении K_y и $f = f_0$. Для этого:

— изменяя входное напряжение $U_{\text{ВХ}}$, установить $U_{\text{ВЫХ}} = 300$ мВ (гнездо Г4) и измерить значение $U_{\text{ос}}$ (гнездо Г5);

— построить прямую обратной связи на том же рисунке, где построена колебательная характеристика усилителя, откладывая $U_{\text{ВЫХ}} = 300$ мВ по оси ординат, а значение $U_{\text{ос}}$ — по оси абсцисс (прямая обратной связи проходит через полученную точку и начало координат).

5.4.2.3. Измерить амплитуду колебаний RC -генератора при замкнутой обратной связи и том же значении K_y . Для этого:

— замкнуть цепь обратной связи, переключив тумблер В1 в правое положение, и измерить с помощью осциллографа амплитуду колебаний $U_{\text{ВХ}}$ (гнездо Г5) и $U_{\text{ВЫХ}}$ (гнездо Г4).

5.4.2.4. Измерить частоту генерируемых колебаний методом фигур Лиссажу. Для этого:

— отключить внутреннюю развертку осциллографа, в меню DISPLAY/SWEEP/XY;

— вход СН1 осциллографа подключить к выходу исследуемого генератора (гнездо Г4), а вход СН2 осциллографа подключить к выходу генератора НЧ;

— изменяя частоту генератора НЧ, добиться появления на экране осциллографа устойчивого эллипса, что свидетельствует о равенстве частот колебаний обоих генераторов;

— считать с лимба генератора НЧ значение частоты.

5.4.3. Исследование режима регенеративного усиления

5.4.3.1. Снять частотную характеристику регенеративного усилителя, при $K_y < K_0$. Для этого:

- тумблер В1, установить в правое положение, а тумблер В2 — в левое;
- включить внутреннюю развертку, в меню DISPLAY/ SWEEP/ XT;
- подключить генератор НЧ к гнезду Г2, а вход CH1 осциллографа — к гнезду Г4;
- установить на выходе генератора НЧ нулевое напряжение ($U_{\text{ВХ}} = 0$);
- вращая потенциометр К, добиться срыва генерации (наблюдать процесс срыва генерации по осциллографу);
- установить $U_{\text{ВХ}} = 20$ мВ и, изменяя частоту генератора НЧ, снять АЧХ усилителя, результаты измерений занести в таблицу 5.2.

5.4.3.2. Снять амплитудную характеристику регенеративного усилителя при том же значении K_y на частоте $f = f_0$, изменяя $U_{\text{ВХ}}$ через 10 мВ до появления нелинейных искажений, заметных на осциллограмме выходного сигнала (гнездо Г4).

5.4.3.3. Уменьшить коэффициент усиления K_y и повторить п.п. 5.4.3.1., 5.4.3.2.

Таблица 5.2 — АЧХ усилителя

f , кГц					
$U_{\text{ВЫХ}}$, В					
$K(f) = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$					

5.4.4. Исследование режима захвата частоты

Снять зависимость полосы захвата от амплитуды внешней ЭДС при $K_y > K_0$. Для этого:

- при $U_{\text{ВХ}} = 0$ установить $K_y > K_0$, достаточное для генерирования колебаний;
- установить $U_{\text{ВХ}} = 10$ мВ и, изменяя частоту генератора НЧ вблизи f_0 , фиксировать частоты f_1 и f_2 , соответствующие границам полосы захвата (по возникновению биений);
- изменяя $U_{\text{ВХ}}$ через 10 мВ от 10 до 100 мВ, измерить полосу захвата $\Delta f_3 = f_2 - f_1$, результаты измерений занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 — Полоса захвата

$U_{\text{ВХ}}$, мВ	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Δf_3 , Гц										

5.5. Оформление отчета

5.5.1. Сформулировать цель работы.

5.5.2. Изобразить схему лабораторного макета.

5.5.3. Привести результаты предварительного расчета.

5.5.4. Привести таблицы экспериментальных данных и построенные графики.

5.6. Выводы

В выводах необходимо отразить следующее:

- описать вид колебательной характеристики усилителя;
- оценить влияние амплитуды внешней ЭДС на полосу захвата;
- установить влияние амплитуды усиливаемых колебаний на форму АЧХ регенеративного усилителя;
- сопоставить результаты расчетов и эксперимента.

5.7. Контрольные вопросы

5.7.1. Нарисуйте схемы RC -генераторов с мостом Вина и с трехзвенной RC -цепью в обратной связи.

5.7.2. Каковы условия возникновения колебаний в RC -автогенераторе?

5.7.3. Какими элементами схемы определяется частота RC -генератора?

5.7.4. Объясните принцип действия регенеративного усилителя.

5.7.5. Поясните, в чем заключается эффект захвата частоты.

5.7.6. От чего зависит коэффициент усиления регенеративного усилителя?

5.7.7. Чем определяется полоса захвата?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 1. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. — М.: Дрофа, 2006. — 720 с.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. — М.: Высшая школа, 2005. — 464 с.
3. Гимпилевич Ю.Б. Сигналы и процессы в радиотехнике. — Ч. 1: Учеб. Пособие / Ю.Б. Гимпилевич. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. — 272 с.
4. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы: компьютеризированный курс [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обуч. по напр. подгот. дипломир. спец. "Радиотехника" / В.И. Каганов. — М. : Форум : Инфра — М, 2012. — 432 с. : ил.
5. Радиотехнические цепи и сигналы. Примеры и задачи: Учеб. пособие для Вузов / Г.Г. Галустов, И.С. Гоноровский, М.П. Демин и др.; Под ред. И.С. Гоноровского. — М.: Радио и связь, 1989. — 248 с.
6. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Руководство к решению задач: Учеб. пособие для радиотехн. спец. Вузов / С.И. Баскаков. — М.: Высшая школа, 1987. — 207 с.