

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

Кафедра электроники

**В.Т. Першин**

***ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ  
КОЛЕБАНИЙ***

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ,  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ,  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ, ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА, МАРКЕТИНГ  
всех форм обучения

Минск 2006

УДК 621.37/39+681.3.06(075.8)

ББК 32.84+32.97 я 73

П 27

Р е ц е н з е н т:

доцент кафедры защиты информации БГУИР,

канд. техн. наук, доцент Н.И.Шатило

**Першин В.Т.**

П 27

Генераторы гармонических колебаний: Учебно-метод. пособие для студ. спец. «Микро- и наноэлектронные технологии и системы», «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств», «Проектирование и производство радиоэлектронных средств», «Экономика и организация производства», «Маркетинг» всех форм обуч. – Мн.: БГУИР, 2006. – 68 с.: ил.

ISBN 985-444-913-0

Учебное пособие служит руководством для практических и лабораторных занятий по курсам «Основы радиоэлектроники» и «Основы радиоэлектроники и схемотехники» и позволяет изучить процессы генерирования гармонических колебаний в схемах LC- и RC-генераторов. Пособие составлено с учетом тенденции к сокращению времени аудиторных занятий и поэтому содержит большое число решенных задач, ознакомившись с которыми студенту легче будет разобраться с аналогичными примерами других источников. Особое внимание уделено рассмотрению анализа работы генераторов гармонических колебаний в терминах линейной и квазилинейной теорий ввиду отсутствия такой систематизации в других сборниках задач. Рассмотрен ряд примеров практических расчетов фазовых портретов автогенератора, выполненных с помощью математического пакета Mathcad 2000 Professional.

УДК 621.37/39+681.3.06(075.8)

ББК 32.84+32.97 я 73

ISBN 985-444-913-0

© Першин В.Т., 2006

© БГУИР, 2006

## ВВЕДЕНИЕ

Радиоэлектроника находится в состоянии совершенствования и развития и непрерывно обогащается новейшими достижениями в области *схемотехники*.

Курс «Основы радиоэлектроники и схемотехники» представляет собой изложение основных идей радиоэлектроники в глубокой связи со схемотехническими решениями изучаемых вопросов и, несмотря на сложное название, является дисциплиной, в которой объекты ее изучаются в единстве физических процессов и их реализаций схемотехническими решениями. При этом основные процессы преобразования информации рассматриваются не только с теоретической, физической стороны изучаемых явлений, но и в плане схемотехнических вариантов реализации устройств, в которых протекают эти процессы. Теоретический анализ радиоэлектронных устройств проводится на конкретных схемотехнических решениях, что позволит студентам освоить основные идеи схемотехники изучаемых устройств.

Отличительной чертой высшего образования в настоящее время является изменение его содержания в соответствии с новыми государственными стандартами и появлением новых технологий преподавания, широко использующими средства вычислительной техники на различных этапах образовательного процесса. Особое место занимают в процессе получения и обработки информации общематематические и специализированные пакеты типа MathCAD, Mathematica, Matlab и другие. Эти пакеты имеют дружественный интерфейс и постоянно развиваются, с каждой новой версией предоставляя пользователю все новые и новые возможности.

Ввиду достаточно большой сложности современных радиоэлектронных устройств используются по крайней мере два уровня их схемотехнического представления. Первый уровень соответствует наиболее детальному описанию основных параметров и характеристик радиоэлектронного устройства и представляет собою *электрическую схему* устройства, состоящую из отдельных компонентов: резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов, транзисторов и т.д. Второй уровень соответствует представлению устройства в виде *структурной схемы*, представляющей собой соединение отдельных логически или функционально самостоятельных узлов, являющихся аналоговыми или цифровыми устройствами, с помощью которых можно реализовать определенную аналоговую, цифровую или аналого-цифровую функцию.

В настоящем учебном пособии используется системный подход в изложении материала, посвященного изучению процессов генерирования гармонических колебаний с помощью LC- и RC-автогенераторов. Пособие служит руководством по практическим и лабораторным занятиям. В нем рассматриваются два подхода к анализу работы и изучению практических схем автогенераторов, основанных на принципах линейной и квазилинейной теорий автогенератора. Часто одна и та же задача решается как в терминах линейной теории генератора, так и в терминах квазилинейной теории. Причем эти два подхода не противопоставляются друг другу, а используются для анализа разных моделей генератора, положенных в основу рассмотрения. Являясь практическим руко-

водством по изучению работы генераторов гармонических колебаний, пособие тем не менее содержит необходимый теоретический материал, который полезен при тщательном исследовании практической работы автогенератора в условиях лабораторной работы. Учитывая наметившуюся в последнее время тенденцию сокращения времени на аудиторное изучение дисциплины в пособии приведено достаточное число решенных задач, методика решения которых четко соответствует идее изучения генератора гармонических колебаний в терминах линейной и квазилинейной теории.

Следует отметить, что в процессе развития радиоэлектроники все большее количество отдельных радиоэлектронных устройств реализуется в микроэлектронном исполнении. Методы проектирования таких функционально сложных устройств можно использовать для разработки устройств аналогичного назначения на микросхемах малой и большой степени интеграции. Примером такого решения задачи могут служить микросхемы, в своей структуре реализующие все основные функции супергетеродинного радиоприемника.

Таким образом, *схемотехника* представляет собой раздел радиоэлектроники, охватывающий исследование и разработку схемотехнических решений на уровне электрических и структурных схем устройств, используемых в радиоэлектронной аппаратуре. Схемное и структурное проектирование – это две основные стадии процесса схемотехнического проектирования. Методы разработки структурных и электрических схем, их типовые варианты, наиболее широко использующиеся в современной радиоэлектронике, и являются предметом изучения в настоящем учебном пособии. Последующая стадия конструкторско-технологического проектирования включает этапы выбора или разработки технологического процесса для производства радиоэлектронных устройств как товара.

При изучении этих вопросов на практических занятиях широко используется практика решения задач в среде пакета символьной алгебры Mathcad 2000 Professional. В книге содержится ряд примеров выполнения таких расчетов.

В работе над пособием помощь советами и участием в подготовке рукописи оказали автору сотрудники кафедры электроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, среди которых стоит отметить С.В. Дробота и В.Т. Мыхлика. Многочисленные и ценные замечания сделал при рецензировании рукописи доцент кафедры защиты информации кандидат технических наук Н.И. Шатило.

Автор выражает своим коллегам по работе и рецензенту искреннюю благодарность.

# ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Наиболее распространенными схемами получения гармонических колебаний являются схемы так называемых LC-генераторов с колебательным контуром для получения высокочастотных колебаний и схемы так называемых RC-генераторов почти гармонических низкочастотных колебаний.

При изучении принципов работы этих генераторов используются различные модели, анализируемые на различных уровнях теоретического рассмотрения.

## 1. LC-АВТОГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

### 1.1. Понятие автоколебательной системы

*Автоколебательной системой* называется устройство, способное создавать незатухающие колебания и характеризующееся наличием:

- источника энергии (источника питания);
- колебательной системы;
- клапана, регулирующего поступление энергии от источника в колебательную систему;
- обратной связи с колебательной системы на клапан.

Структурная схема автоколебательной системы показана на рис. 1.1. Из этой схемы видно, что незатухающие колебания создаются с помощью колебательной системы за счет энергии источника питания. При этом клапан управляет работой колебательной системы, а колебательная система управляет работой клапана за счет передачи энергии из колебательной системы на вход клапана. Такое обратное воздействие, т.е. передача энергии с выхода колебательной системы на ее вход через клапан, называется *обратной связью*.

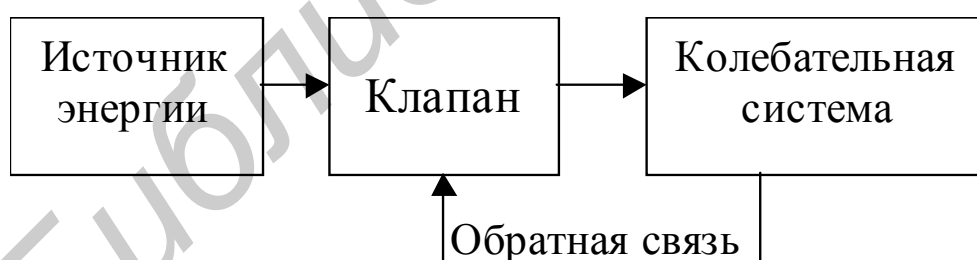


Рис. 1.1. Структурная схема автоколебательной системы

Радиотехническое устройство, которое для создания незатухающих колебаний не использует никаких источников энергии, кроме источника питания, называется *автогенератором*.

## 1.2. Физическая сущность возникновения колебаний в схеме LC-автогенератора

Рассмотрим работу схемы простейшего автогенератора незатухающих колебаний. В качестве примера возьмем схему автогенератора с контуром в цепи коллектора (рис. 1.2), которой присущи все признаки автоколебательной системы. Действительно, источником энергии служит батарея коллекторного питания  $E_K$ , колебательная система выполнена в виде колебательного контура с достаточно высокой добротностью, в качестве клапана используется транзистор, обратная связь выполнена с помощью взаимной индуктивности между катушкой индуктивности колебательного контура и катушкой обратной связи, подключенной к промежутку эмиттер – база транзистора.

Рассмотрим процесс возникновения колебаний в этой схеме. При включении коллекторного питания в колебательном контуре возникают свободные колебания. Благодаря взаимной индуктивности  $M$  часть энергии свободных колебаний подается на базу транзистора, усиливается им и поступает в коллекторную цепь транзистора. Таким образом, колебания из базовой цепи транзистора поступают в его коллекторную цепь и, если эти колебания имеют энергию, превосходящую потери в колебательном контуре, амплитуда напряжения на коллекторном контуре будет расти до тех пор, пока нелинейность характеристики транзистора не ограничит этот рост. Очевидно, что для поддержания автоколебаний энергия, доставляемая в колебательный контур усиленным транзистором колебаниями, должна быть не меньше потерь энергии свободных колебаний в контуре. Это условие называется *балансом амплитуд*. Легко понять, что это условие является необходимым для поддержания режима незатухающих колебаний в автогенераторе, так как в случае его невыполнения свободные колебания в контуре быстро затухнут. Однако выполнения этого условия недостаточно для поддержания режима незатухающих колебаний в анализируемой схеме, поскольку важны фазовые соотношения между свободными колебаниями в контуре и колебаниями, поступающими в контур из коллекторной цепи. Очевидно, что фаза усиленных транзистором колебаний должна совпадать с фазой свободных колебаний в контуре, так как в ином случае усиленные транзистором колебания приведут к уменьшению, а не к увеличению амплитуды свободных колебаний в контуре. Это условие *синфазности* усиленных транзистором и свободных колебаний называется *балансом фаз*.

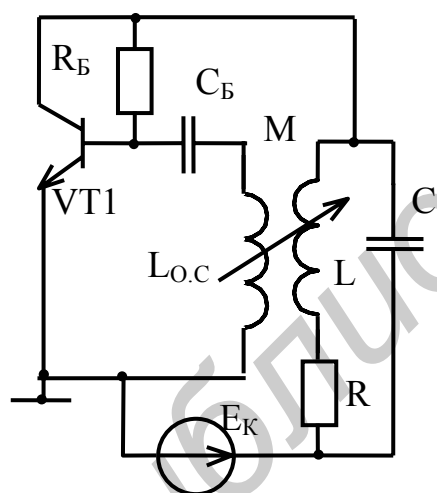


Рис. 1.2. Принципиальная схема автогенератора с контуром в цепи коллектора

колебаний в контуре. Это условие *синфазности* усиленных транзистором и свободных колебаний называется *балансом фаз*.

Итак, для возникновения незатухающих автоколебаний в рассматриваемой схеме необходимо и достаточно выполнение двух условий: баланса амплитуд и баланса фаз.

### 1.3. Различные уровни изучения процессов в генераторе

Автогенератор является сугубо нелинейным устройством. Тем не менее можно выделить три различных уровня, на которых рассматривается работа генератора. Этим уровням соответствуют три различные теории автогенератора, которые отличаются одна от другой предпосылками, лежащими в их основе:

- линейная теория;
- квазилинейная теория;
- нелинейная теория.

В основе построения *линейной* теории автогенератора лежит допущение о линейности вольт-амперной характеристики транзистора. Конечно, в общем случае характеристика транзистора является нелинейной, но при определенных условиях ее часто можно считать линейной. Основным допущением при построении линейной теории транзисторного автогенератора является допущение о линейности вольт-амперной характеристики используемого в схеме этого генератора транзистора. В более общем плане при построении линейной теории генератора считается, что транзистор является линейным устройством и для описания процессов, протекающих в нем, можно использовать эквивалентную схему замещения (рис. 1.3). Таким образом, транзистор замещается источником напряжения  $-\mu U_B$  с внутренним сопротивлением  $R_i$ . Здесь  $\mu$  – коэффициент усиления транзистора по напряжению, а знак минус отражает противофазные изменения коллекторного  $U_K$  и базового  $U_B$  напряжений.

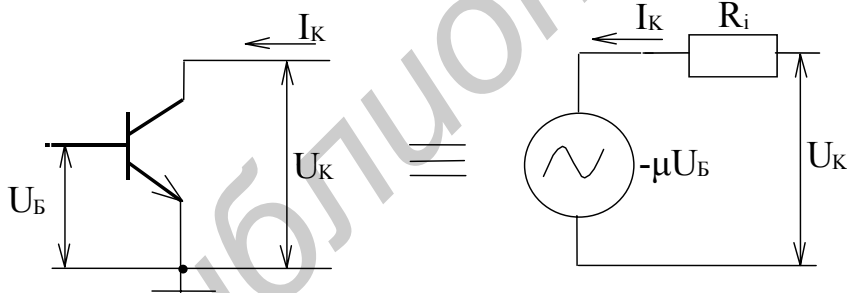


Рис. 1.3. Линейная схема замещения транзистора

Теория, построенная на такой основе, дает возможность определить условия самовозбуждения схемы, оценить частоту генерируемых колебаний, определить закон, по которому будет возрастать ам-

плитуда генерируемых колебаний. Тем не менее скоро обнаружатся и недостатки этой теории: находясь в ее рамках, нечего сказать о стационарной амплитуде установившихся колебаний, так как допущение о линейности вольт-амперной характеристики устраняет механизм изменения амплитуды генерируемых колебаний и открывает перспективу для ее неограниченного роста.

*Квазилинейная* (почти линейная) теория учитывает нелинейность вольт-амперной характеристики с помощью *средних параметров* и сохраняет формально линейное описание анализируемой схемы. Например, как легко видеть

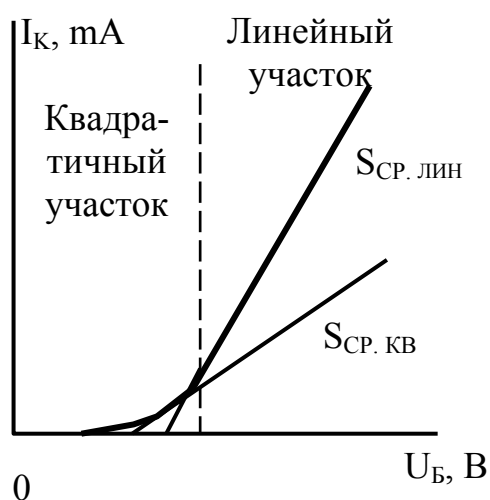


Рис. 1.4. Типичная вольт-амперная характеристика транзистора

из рис. 1.4, на котором приведена типичная вольт-амперная характеристика транзистора, ее крутизна  $S = dI_K/dU_B$  зависит от положения рабочей точки транзистора. Эта характеристика имеет так называемый квадратичный участок при малых напряжениях  $U_B$  и линейный участок, соответствующий значительным уровням напряжения на базе транзистора. Если положение рабочей точки выбрано на квадратичном участке, то величина крутизны будет значительно меньше, чем когда рабочая точка находится на линейном участке. Поэтому вводится понятие *средней крутизны* как крутизны, зависящей от положения рабочей точки и определяемой отношением  $I_{Km}$

амплитуды первой гармоники коллекторного тока к амплитуде гармонического напряжения  $U_{Bm}$ , действующего на базе транзистора  $S_{CP} = I_{Km}/U_{Bm}$ . Несмотря на то, что коллекторный ток по форме может отличаться от гармонического, в выражение для расчета средней крутизны подставляем только величину его первой гармоники. Применительно к схеме генератора это означает, что колебательная система генератора должна располагать хорошей избирательностью, чтобы сделать вклад других гармоник коллекторного тока в его общую величину незначительным. Особенностью этой теории является сохранение линейного описания процесса генерирования колебаний при учете нелинейности схемы. В результате имеется возможность в рамках этой теории провести анализ схемы линейными средствами от момента возникновения автоколебаний вплоть до установления стационарной амплитуды генерируемых колебаний.

*Нелинейная* теория наиболее тщательно может исследовать поведение схемы, в которой генерируются автоколебания, однако методы этой теории чрезвычайно сложны, так как сводят решение анализа поведения схемы к нелинейным уравнениям, теория которых разработана очень слабо.

Поэтому исследователи и разработчики схем автогенераторов на практике чаще всего пользуются в своей работе методами и средствами квазилинейной теории.

**Пример 1.1.** Получить условие самовозбуждения схемы автогенератора с контуром в цепи коллектора (рис. 1.2). Установить закон, по которому изменяется амплитуда возбуждаемых в схеме колебаний, найти частоту генерируемых колебаний.

Рассмотрим процесс установления колебаний в автогенераторе с контуром в цепи коллектора, собранном по схеме (см. рис. 1.2). Поскольку главный интерес представляют процессы, протекающие на переменном токе, то для анализа по-



строим эквивалентную схему автогенератора по переменному току, приведенную на рис. 1.5. Линейную теорию имеет смысл применять для анализа схем, в которых только начинают возбуждаться автоколебания, поскольку только в этом случае можно считать транзистор линейным элементом, работающим при малых величинах амплитуд генерируемых колебаний.

Составим дифференциальное уравнение, описывающее поведение этой схемы. Поскольку транзистор считается линейным устройством, то для него является справедливой схема замещения, отражающая связь между входным и выходным напряжениями (рис. 1.2).

Из схемы, приведенной на рис. 1.2, находим, что

$$I_K = S(U_B - DU_K), \quad (1.1)$$

где  $S$ ,  $D$  – крутизна и проницаемость транзистора соответственно и  $D = 1/\mu$ .

Это уравнение связывает ток коллектора с напряжениями, действующими на его базе и коллекторе. Но величина этого же тока также определяется и параметрами схемы, подключенной к транзистору. Мы видим, что ток коллектора представляет собой сумму токов, протекающих в индуктивности и емкости колебательного контура

$$I_K = I_L + I_C. \quad (1.2)$$

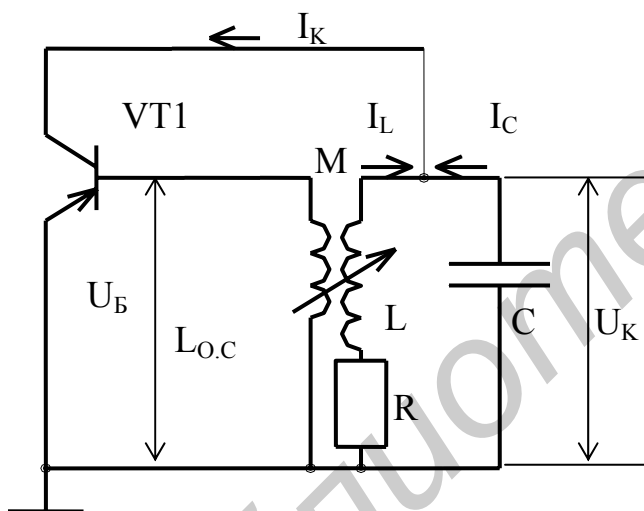


Рис. 1.5. Схема автогенератора, анализируемого в терминах линейной теории

тока можно составить уравнение

$$I_k = I_L + RC \frac{dI_L}{dt} + LC \frac{d^2 I_L}{dt^2}. \quad (1.3)$$

Запишем теперь уравнение (1.1), заменив в нем действующие напряжения на ток, протекающий в индуктивной ветви. Учтем, что

$$U_B = \pm M \frac{dI_L}{dt}.$$

Тогда уравнение (1.1) можно переписать следующим образом:

Поскольку ток в емкости определяется скоростью изменения коллекторного напряжения

$$I_C = C \frac{dU_K}{dt},$$

а коллекторное напряжение представляет собой сумму падений напряжения на индуктивности контура и сопротивлении  $R$

$$U_K = L \frac{dI_L}{dt} + I_L R,$$

то для тока в емкости можно записать

$$I_C = LC \frac{d^2 I_L}{dt^2} + RC \frac{dI_L}{dt}.$$

Теперь для коллекторного

$$I_K = S(M \frac{dI_L}{dt} - D(L \frac{dI_L}{dt} + I_L R)) = (SM - SDL) \frac{dI_L}{dt} + SDRI_L. \quad (1.4)$$

Сравнивая правые части уравнений (1.3) и (1.4), получаем

$$\frac{d^2 I_L}{dt^2} + \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{R_i C} - \frac{SM}{LC} \right) \frac{dI_L}{dt} + \frac{1 + \frac{R}{R_i}}{LC} I_L = 0.$$

Учитывая, что  $R \ll R_i$ , и обозначив

$$\frac{R}{L} + \frac{1}{R_i C} - \frac{SM}{LC} = 2\alpha,$$

получим уравнение, описывающее ток в индуктивной ветви

$$\frac{d^2 I_L}{dt^2} + 2\alpha \frac{dI_L}{dt} + \omega_0^2 I_L = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$I_L = A_0 e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t.$$

Характер колебания  $I_L$  зависит от коэффициента  $\alpha$ . Если  $\alpha > 0$ , то колебания затухнут со временем.

Рассмотрим подробнее выражение для  $\alpha$ . При  $M = 0$   $\alpha > 0$ . Это означает, что при  $M = 0$  колебания в генераторе будут затухать (рис. 1.6).

При возрастании связи в контур вносится некоторое отрицательное сопротивление по абсолютной величине, равное  $SM/C$ .

Если

$$\frac{SM}{C} > R + \frac{1}{R_i C}, \quad (1.5)$$

то результирующее сопротивление может стать отрицательным. В этом случае  $\alpha < 0$  и ток в индуктивной ветви будет нарастать по закону

$$I_L = A_0 e^{|\alpha|t} \sin \omega_0 t. \quad (1.6)$$

Таким образом, условие (1.5) обеспечивает рост амплитуды колебаний при сколь угодно малых значениях начальных амплитуд (рис. 1.7).

Этому условию можно придать другую форму, если учесть, что  $k_{O.C} = M/L$  и  $L/RC = Z_{K.P}$ . Тогда

$$S > \frac{1}{(k_{O.C} - D)Z_{K.P}}, \quad (1.7)$$

где  $Z_{K.P}$  – резонансное сопротивление колебательного контура.

Полученное неравенство называется основным неравенством генератора при самовозбуждении и позволяет легко объяснить влияние основных параметров транзистора на возникновение автоколебаний.

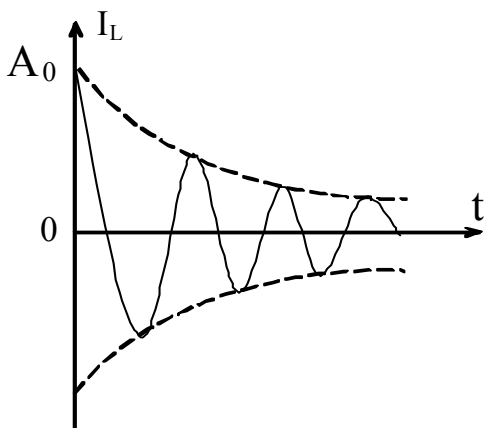


Рис. 1.6. Затухание колебаний в генераторе при  $\alpha > 0$

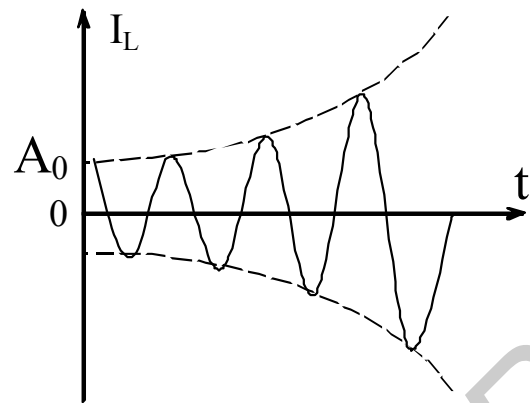


Рис. 1.7. Возрастание амплитуды колебаний при  $\alpha < 0$

#### 1.4. Квазилинейная теория автогенератора

Полученное в терминах линейной теории условие самовозбуждения генератора ничего не говорит о стационарной амплитуде автоколебаний. Согласно линейной теории автогенератора, амплитуда колебаний должна возрастать неограниченно. Однако это не так, так как при больших амплитудах возбуждения вступает в силу нелинейность характеристики транзистора, которая ограничит рост амплитуды генерируемых колебаний.

Для более тщательного анализа механизма возбуждения автоколебаний надо учитывать зависимость крутизны характеристики от амплитуды генерируемых колебаний.

В течение одного периода базового напряжения используются участки характеристики с различной крутизной. Характеристику транзистора в этом случае уже нельзя описывать уравнением, полученным из линейной схемы замещения, так как крутизна зависит от амплитуды базового напряжения.

Линейная теория не может учесть это обстоятельство. Поэтому обращаются к помощи квазилинейных методов.

Сущность *квазилинейной теории* заключается в том, что за один период базового напряжения принимаются неизменными амплитуда базового напряжения и крутизна характеристики транзистора. Это приводит к постоянству также и первой гармоники коллекторного тока. Это значит, что развитие процесса возрастания амплитуды колебаний в генераторе происходит скачкообразно от одного значения амплитуды базового напряжения к следующему, как показано на рис. 1.8.

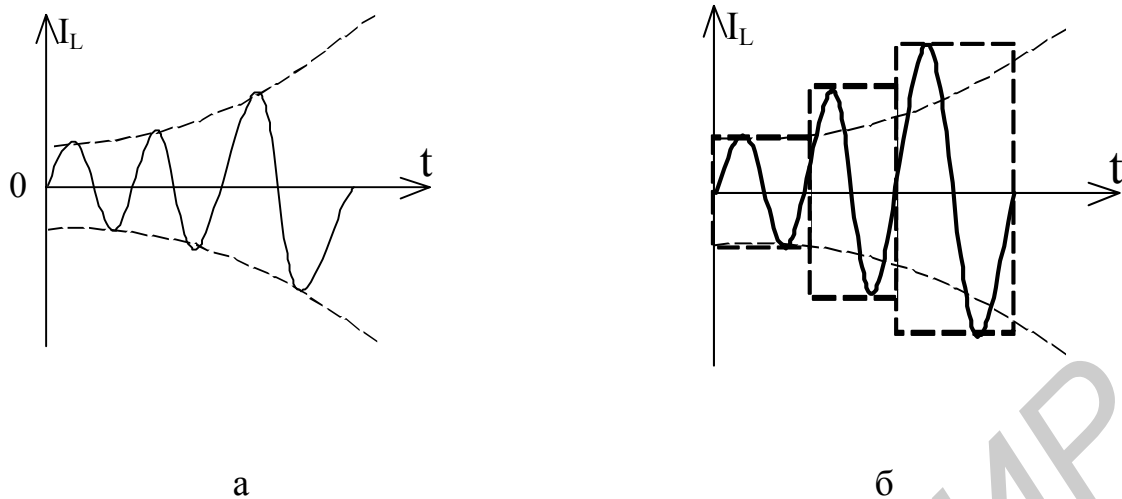


Рис. 1.8 Процесс нарастания амплитуды реальных автоколебаний (а) и его представление в квазилинейной теории генератора (б)

### 1.5. Обобщенная схема автогенератора в квазилинейной теории

Наша задача – получить условие самовозбуждения автогенератора в терминах квазилинейной теории. Приступая к ее решению, построим так называемую *обобщенную* схему анализируемого автогенератора, содержащую нелинейный усилительный элемент и четырехполюсник обратной связи  $Z_K$ . При этом входными зажимами четырехполюсник подключается к выходу усилителя, а выходными – к его входу. Затем перейдем к анализу условий возбуждения этой схемы. После получения этих условий можем получить условия самовозбуждения *конкретной* схемы, представив ее в виде обобщенной.

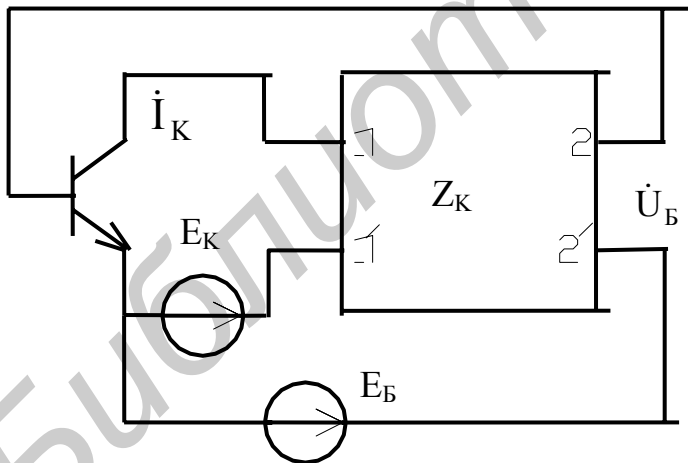


Рис. 1.9. Обобщенная схема автогенератора в квазилинейной теории

тауд. Обобщенная схема автогенератора, анализируемая этим методом, показана на рис. 1.9.

Зависимость тока, протекающего через транзистор, от параметров транзистора и напряжений, действующих на его электродах, описывается уравнением,

линейным по форме, но нелинейным по содержанию. Учитывая нелинейный характер схемы, введем в рассмотрение некоторую среднюю крутизну  $S_{CP}$ , представляющую собой коэффициент пропорциональности между током коллектора и суммой определяющих его напряжений. Согласно обобщенной схеме

$$\dot{I}_K = S_{CP} (\dot{U}_B - D \dot{U}_K). \quad (1.8)$$

Если сопротивление между зажимами 1 – 1' обозначить  $Z_K$ , то ток коллектора можно определить по соотношению

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{U}_K}{Z_K}. \quad (1.9)$$

Сравнивая правые части уравнений (1.8) и (1.9), имеем

$$S_{CP} (\dot{U}_B - D \dot{U}_K) = \frac{\dot{U}_K}{Z_K}. \quad (1.10)$$

Так как

$$k_{O.C.} = - \frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_K},$$

то уравнение (1.10) можно подать в форме

$$S_{CP} = \frac{1}{(|k_{O.C.}| - D) Z_K}.$$

Усилим это равенство и получим основное уравнение, описывающее процесс самовозбуждения генератора вплоть до установления стационарной амплитуды:

$$S_{CP} \geq \frac{1}{(|k_{O.C.}| - D) Z_K}. \quad (1.11)$$

Обсудим полученный результат. Пока не сказывается инерция носителей электрического заряда,  $S_{CP} > 0$ . Значит, при самовозбуждении мнимая часть этого уравнения равна нулю. Это условие – математическое выражение баланса фаз. Оно определяет частоту генерируемых колебаний. Основное неравенство (1.11) в действительной форме представляет собой баланс амплитуд и используется для нахождения стационарной амплитуды генерируемых колебаний.

**Пример 1.2.** Получить условие самовозбуждения схемы автогенератора с контуром в цепи коллектора (рис. 1.2) и найти частоту генерируемых колебаний в терминах квазилинейной теории генератора.

Для решения поставленной задачи нужно эквивалентную схему анализируемого генератора (см. рис. 1.5) представить в виде обобщенной схемы автогенератора. Тогда можно будет записать условие ее самовозбуждения в виде (1.11), и после этого конкретизировать величины  $k_{O.C.}$  и  $Z_K$ .

Перечертим эквивалентную схему автогенератора и представим ее в виде обобщенной (рис. 1.10). Следовательно, условием самовозбуждения этой схемы является (1.11). Рассчитаем величины  $k_{o.c}$  и  $Z_K$ . Имеем

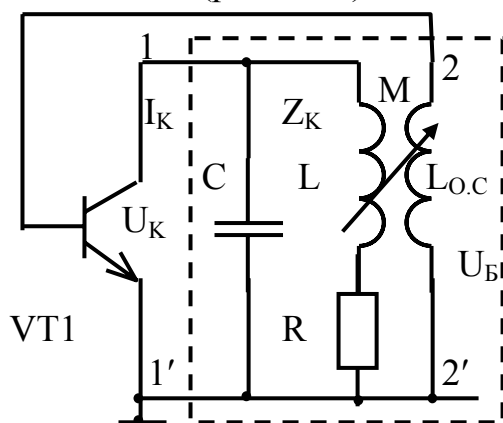


Рис. 1.10. Представление схемы генератора с контуром в цепи коллектора в виде обобщенной схемы

является (1.11). Рассчитаем величины  $k_{o.c}$  и  $Z_K$ . Имеем

$$|k_{oc}| = \left| \frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_K} \right| = \left| \frac{i\omega M \dot{I}_L}{i\omega L \dot{I}_L} \right| = \frac{M}{L}.$$

Сопротивление  $Z_K$  представляет собой входное сопротивление четырехполюсника обратной связи, т.е. сопротивление его между зажимами 1 – 1'. Пренебрегая влиянием цепи обратной связи на величину входного сопротивления, считаем, что оно определяется сопротивлением параллельного колебательного контура генератора по формуле

$$Z_K = \frac{Z_{K.P}}{1 + ia},$$

где  $a = (\omega L - 1/\omega C)/R$  – обобщенная рас-

стройка контура. Таким образом, условие самовозбуждения схемы автогенератора с контуром в цепи коллектора имеет вид

$$S_{CP} \geq \frac{1}{\left(\frac{M}{L} - D\right) \frac{Z_{K.P}}{1 + ia}}.$$

Поскольку левая часть этого неравенства является существенно положительным числом, то и правая часть представляет собой положительной число. Это означает, что  $a = 0$ . Это является математической формулировкой баланса фаз в автогенераторе, которое позволяет вычислить частоту генерируемых колебаний  $\omega_{ген} = 1/\sqrt{LC}$ . С учетом этого получаем для условия баланса амплитуд выражение

$$S_{CP} \geq \frac{1}{(k_{o.c} - D)Z_{K.P}}.$$

Сравнивая полученное выражение с полученным в рамках линейной теории, видим, что оно отличается только тем, что появилось новое качество у крутизны: работа продолжается со средней крутизной и генерирование колебаний может рассматриваться вплоть до установления стационарной амплитуды, что невозможно было сделать в рамках линейной теории автогенератора.

## 1.6. Основные схемы LC-генераторов и их эквивалентные схемы

Схема генератора с контуром в цепи коллектора с *последовательным* питанием представляется эквивалентной схемой, показанной на рис. 1.11.

Схема генератора с контуром в цепи коллектора с *параллельным* питанием приведена на рис. 1.12.

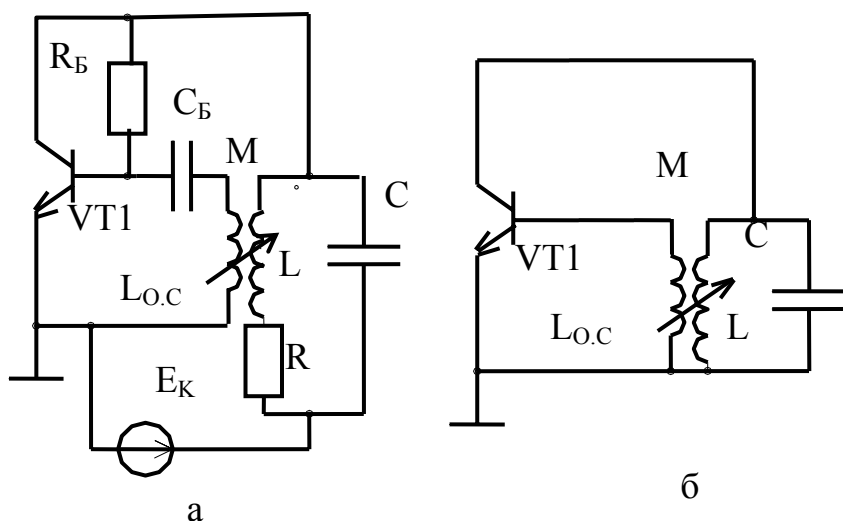


Рис. 1.11. Схема генератора с контуром в цепи коллектора с последовательным питанием (а) и схема замещения по переменному току (б)

Схема генератора с контуром в цепи базы приведена на рис. 1.13. В этом случае колебательный контур включен в базовую цепь транзистора. Поскольку входное сопротивление контура при этом значительно ниже, чем в предыдущем случае, то это заставляет выбирать колебательную схему с достаточно высокой добротностью, иначе возбудить такую схему не представляется возможным.

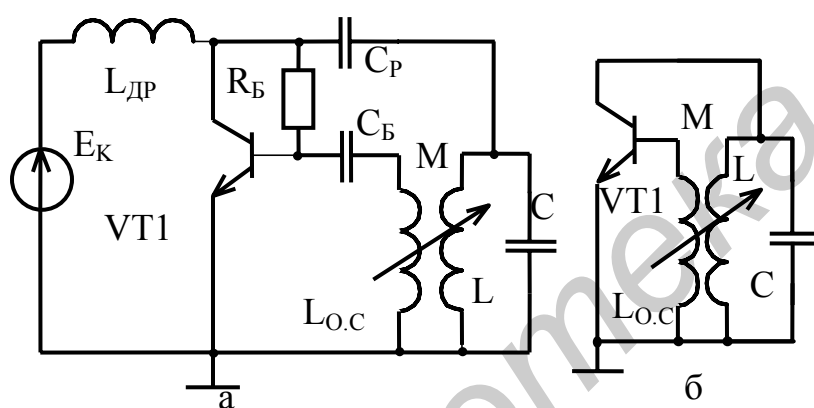


Рис. 1.12. Схема генератора с контуром в цепи коллектора с параллельным питанием (а) и эквивалентная схема по переменному току (б)

На рис. 1.13, в изображена схема автогенератора с контуром в цепи эмиттера, широко используемая в преобразователях частоты с совмещенным гетеродином.

Напряжение сигнала снимается с колебательного контура и подается в цепь эмиттера. Контур при этом включается, как правило, не

полностью, поскольку сопротивление в цепи эмиттера имеет небольшую величину и в противном случае будет сильно его шунтировать.

**Пример 1.3.** В терминах линейной теории генератора получить условие самовозбуждения и рассчитать частоту генерируемых колебаний для схемы генератора с контуром в цепи базы (рис. 1.13, а).

Запишем уравнение второго закона Кирхгофа для колебательного контура, включенного в базовую цепь транзистора:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = M \frac{dI_K}{dt}.$$

Здесь  $i$  – ток в контуре,  $I_K$  – коллекторный ток. Преобразуем это уравнение таким образом, чтобы оно было записано относительно только одной пере-

менной, например относительно напряжения  $U_B$  на базе транзистора. При этом надо учесть, что

$$U_B = \frac{1}{C} \int i dt, \quad i = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{dU_B}{dt}, \quad \frac{di}{dt} = C \frac{d^2 U_B}{dt^2}.$$

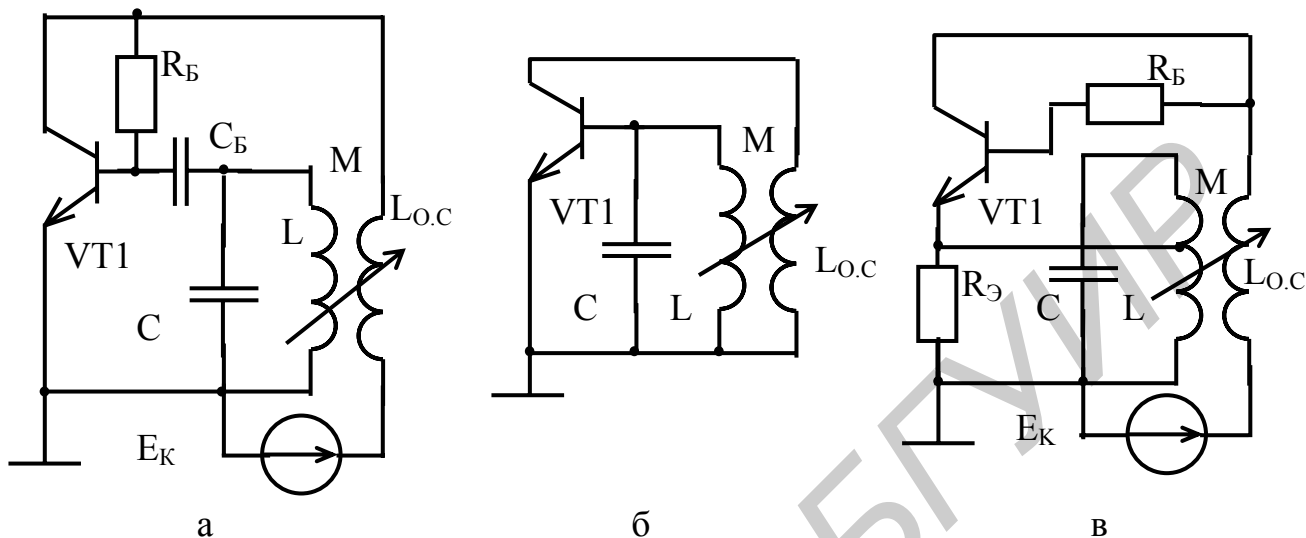


Рис. 1.13. Схема генератора с контуром в цепи базы (а), её эквивалентная схема по переменному току (б) и схема автогенератора с контуром в цепи эмиттера (в)

Пренебрегая реакцией нагрузки, выразим  $dI_K/dt$  следующим образом:

$$\frac{dI_K}{dt} = \frac{dI_K}{dU_B} \cdot \frac{dU_B}{dt} = S \cdot \frac{dU_B}{dt}.$$

Теперь можно составить дифференциальное уравнение для одной переменной, которой является напряжение  $U_B$  на базе транзистора:

$$LC \frac{d^2 U_B}{dt^2} + RC \frac{dU_B}{dt} + U_B = SM \frac{dU_B}{dt}.$$

Перепишем это уравнение еще раз, преобразовав к виду:

$$\frac{d^2 U_B}{dt^2} + \left( \frac{R}{L} - \frac{SM}{LC} \right) \cdot \frac{dU_B}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot U_B = 0.$$

Вводя обозначения

$$\frac{R}{L} - \frac{SM}{LC} = 2\alpha, \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2,$$

аналогично тому, как это делалось раньше, приходим к уже известному уравнению

$$\frac{d^2 U_B}{dt^2} + 2\alpha \frac{dU_B}{dt} + \omega_0^2 U_B = 0.$$

Решение этого уравнения имеет следующий вид:

$$U_B = A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin \omega_0 t,$$



из которого видно, что амплитуда гармонических колебаний с частотой  $\omega_0$  на базе транзистора будет нарастать со временем, если  $\alpha < 0$ . Таким образом, условием самовозбуждения схемы с контуром в цепи базы является

$$\frac{R}{L} - \frac{SM}{LC} < 0$$

или

$$S > \frac{RC}{M},$$

а частота генерируемых колебаний определяется резонансной частотой колебательного контура, включенного в базовую цепь транзистора.

**Пример 1.4.** В терминах квазилинейной теории автогенератора получить условие самовозбуждения схемы генератора с колебательным контуром в базовой цепи транзистора. Оценить частоту генерируемых колебаний (рис. 1.13,а).

Представим эквивалентную схему генератора с контуром в цепи базы транзистора (см. рис. 1.13,б) в виде обобщенной (рис. 1.14).

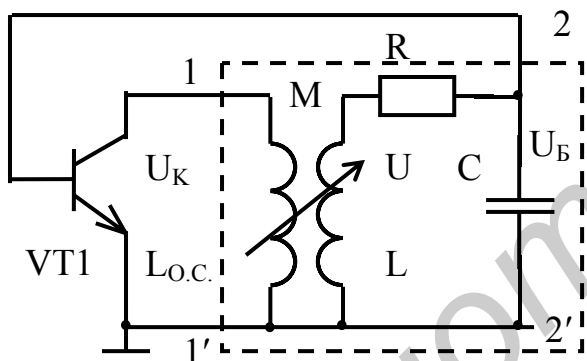


Рис. 1.14. Эквивалентная схема генератора с контуром в цепи базы

Так как схема приводится к виду обобщенной, то условием ее самовозбуждения является формула (1.11). Конкретизируем параметры этой формулы. Очевидно, что  $Z_K \approx i\omega L_{0.c}$ . Рассчитаем величину коэффициента обратной связи. Поскольку ток  $I_K$  создает в контуре генератора напряжение  $\dot{U} = \pm i\omega M \cdot I_K$ , то напряжение  $\dot{U}_B$ , выделяющееся на конденсаторе С можно записать в виде

$$U_B = \frac{\dot{U}}{R + i(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \cdot \frac{1}{i\omega C}.$$

Тогда

$$k_{0.c} = \frac{M}{i\omega L_{0.c} RC [1 + i(\omega L - \frac{1}{\omega C})]}.$$

Подставляя полученные выражения для  $Z_K$  и  $k_{0.c}$  в формулу (1.11), получим для условия возбуждения схемы

$$S_{CP} \geq \frac{1}{\left[ \frac{M}{i\omega L_{O.C} RC} \left[ 1 + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \right] - D \right] \cdot i\omega L_{O.C}} \approx \frac{RC}{M \left[ 1 + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \right]}$$

Из условия баланса фаз  $\omega L - 1/\omega C = 0$  получаем для частоты генерируемых колебаний  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ , и условие самовозбуждения принимает вид  $S_{CP} \geq \frac{RC}{M}$ , что совпадает с выражением, полученным в предыдущем примере.

### 1.7. Трехточечные схемы автогенераторов

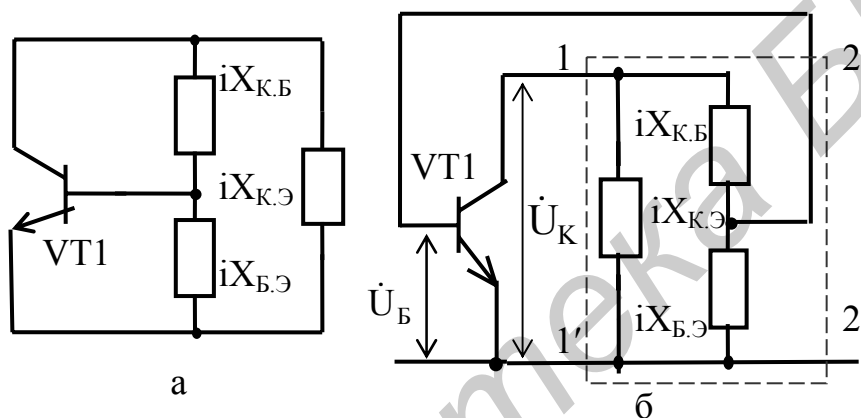


Рис. 1.15. Трехточечная схема автогенератора (а) и ее обобщённая схема (б)

Трехточечной называется такая схема автогенератора, в которой контур подключается к транзистору или лампе своими тремя точками (рис. 1.15,а).

**Пример 1.5.** В терминах линейной теории генератора получить условие самовозбуждения и рассчитать частоту генерируемых колебаний для трехточечной схемы генератора.

Решение этой задачи предоставляется учащимся для самостоятельного решения.

**Пример 1.6.** В терминах квазилинейной теории генератора получить условие самовозбуждения и рассчитать частоту генерируемых колебаний для трехточечной схемы генератора.

Представим анализируемую схему в виде обобщенной (рис. 1.15,б). Теперь нужно конкретизировать для этой схемы два параметра:  $k_{O.C}$  и  $Z_K$ :

Представим анализируемую схему в виде обобщенной (рис. 1.15,б). Теперь нужно конкретизировать для этой схемы два параметра:  $k_{O.C}$  и  $Z_K$ :

$$k_{O.C} = -\frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_K} = -\frac{X_{К.Б}}{X_{К.Б} + X_{Б.Э}},$$

$$Z_K = \frac{X_{КЭ}(X_{БЭ} + X_{КБ})}{R + i(X_{КЭ} + X_{КБ} + X_{БЭ})}$$

Подставим значения найденных величин в основное неравенство генератора и получим

$$S_{CP} \geq - \frac{1}{\left(-\frac{X_{БЭ}}{X_{КБ} + X_{БЭ}} - D\right) \frac{-X_{КЭ}(X_{КЭ} + X_{КБ})}{R + i(X_{КЭ} + X_{КБ} + X_{БЭ})}}$$

Условие выполнения баланса фаз  $X_{КЭ} + X_{КБ} + X_{БЭ} = 0$ . Из него получаем значение частоты генерируемых колебаний, т.е. она является резонансной частотой колебательного контура генератора.

Условие баланса амплитуд:

$$S_{CP} \geq \frac{R}{(X_{БЭ} + DX_{БЭ} + DX_{КБ})X_{КЭ}}$$

Проведем анализ полученных выражений для баланса фаз и баланса амплитуд. Для определенности положим  $X_{КЭ} > 0$ , т.е. будем считать, что  $X_{КЭ}$  представляет собой индуктивность. Тогда индуктивным будет и сопротивление, определяемое выражением  $X_{БЭ}(1+D)+DX_{КБ}>0$ , откуда получаем

$$X_{БЭ} > -DX_{КБ}(1 + D) = -X_{КБ}/(\mu+1).$$

Отсюда делаем вывод, что  $X_{БЭ}$  противоположно по знаку  $X_{КБ}$  и значительно меньше его по величине, точнее, в  $\mu+1$  раз.

Из условия баланса фаз сравним величину  $X_{БЭ}$  с  $X_{КЭ}$ . Имеем

$$X_{БЭ} - (\mu+1)X_{БЭ} + X_{КЭ} = 0,$$

Откуда получаем  $X_{БЭ} = X_{КЭ}/\mu$ , т.е.  $X_{БЭ}$  по знаку совпадает с  $X_{КЭ}$  и значительно меньше его по величине.

Отсюда делаем вывод о том, что из всего многообразия трехточечных схем в качестве генератора будут работать только две. Одна из них называется *емкостной трехточкой*, а другая – *индуктивной трехточкой*. На рис. 1.16 приведена практическая схема индуктивной трехточки.

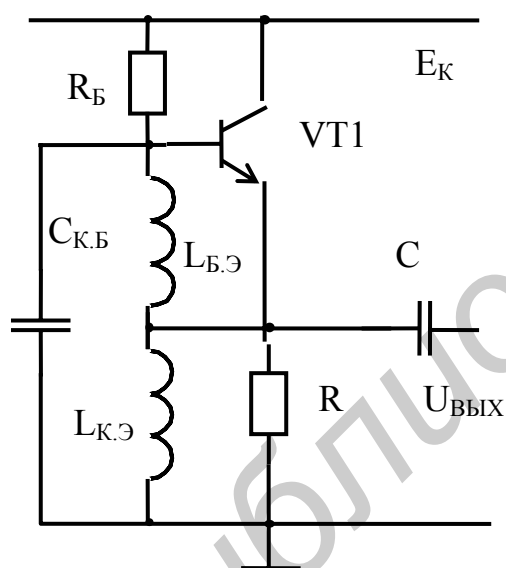


Рис. 1.16. Практическая схема индуктивной трехточки

## 1.8. Кварцевые генераторы

Эти генераторы используются в тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к стабильности частоты задающих генераторов. В радиовещательных станциях диапазона длинных и средних волн абсолютная нестабильность частоты  $\Delta f$ , т.е. уход рабочей частоты  $f$  от номинального значения

$f_0$ , не должен превышать 10 Гц. В радиовещательных станциях, работающих на коротких и ультракоротких волнах, допускаемая относительная нестабильность частоты  $(\Delta f / f_0) \cdot 100 \% \leq 0,002 \%$ . Значительное повышение стабильности частоты можно получить, применяя кварцевые резонаторы, в качестве которых обычно используют пластинки из кварца.

Кварц представляет собой двуокись кремния  $\text{SiO}_2$ , широко распространен в природе, обладает прямым и обратным пьезоэффектом, т.е. при механической деформации пластины кварца на ней появляются электрические заряды (прямой пьезоэффект) и при помещении пластины кварца в электрическое поле она деформируется (обратный пьезоэффект).

Условное изображение кварцевого резонатора показано на рис. 1.17,а, а его эквивалентная электрическая схема – на рис. 1.17,б. На этой схеме кварц заменен последовательным контуром LCR, емкость  $C_0$  – статическая емкость пластин кварцедержателя. Обычно емкость кварца  $C$  равна десятым или сотым долям пикофардады, эквивалентная индуктивность  $L$  – от долей до десятков миллигенри. Эквивалентное сопротивление  $R$  измеряется десятками или сотнями ом. Следовательно, добротность последовательного контура достигает порядка десятков тысяч.

Статическая емкость кварцедержателя  $C_0$  равна 10...40 пФ, т.е. в сотни раз больше емкости кварца  $C$ . Поэтому собственная резонансная частота кварца как последовательного контура близка к собственной частоте эквивалентного параллельного контура (разница этих частот не превышает десятых долей процента).

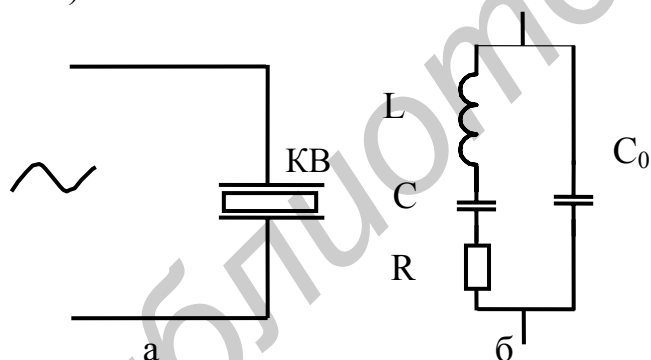


Рис. 1.17. Условное изображение (а) и эквивалентная схема (б) кварцевой пластины с кварцедержателем

Существуют различные схемы кварцевых генераторов. В так называемых осцилляторных схемах используется свойство кварца сохранять индуктивный характер сопротивления в узком диапазоне частот, лежащих между частотами последовательного и параллельного резонанса. Осцилляторные схемы собираются по типу трехточечных. Кварц включается в такие участки схемы, сопротивление которых для выполнения фазового

условия самовозбуждения должно иметь индуктивный характер.

## 1.9. LC-генераторы на приборах с отрицательным сопротивлением

Незатухающие колебания в контуре возможны только в том случае, когда

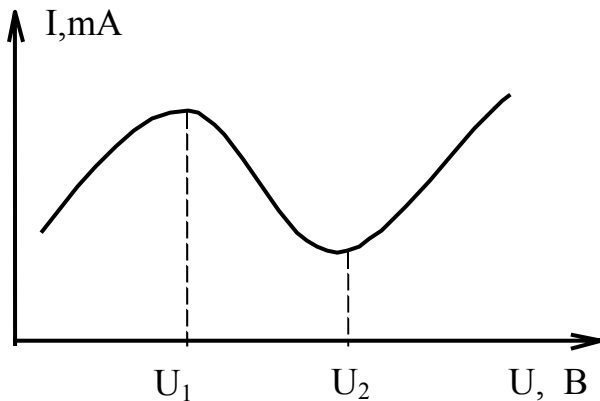


Рис. 1.18. Вольт-амперная характеристика отрицательного сопротивления

его сопротивление потерь равно нулю. Поскольку любой реальный контур обладает потерями, то получение в контуре незатухающих колебаний можно рассматривать как результат внесения в него некоторого отрицательного сопротивления, компенсирующего его положительное сопротивление потерь. Роль такого отрицательного сопротивления играет нелинейный элемент генератора вместе с источником питания. Рассматривая устройство с отрицательным сопротивлением как некоторый двухполюсник, можно построить его вольт-

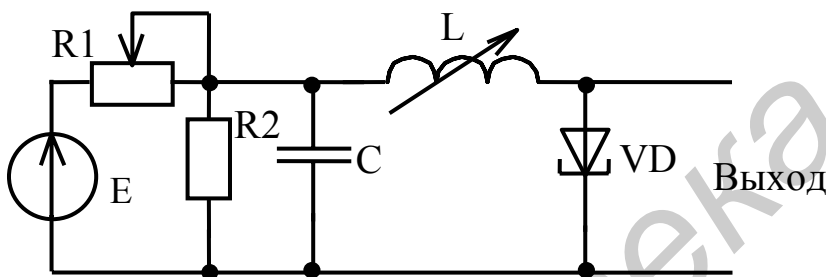


Рис. 1.19. Схема LC-генератора на туннельном диоде

амперную характеристику  $I = f(U)$  (рис. 1.18). Характерной особенностью этой характеристики является наличие падающего участка. В интервале напряжений от  $U_1$  до  $U_2$  сопротивление  $R_L = \Delta U / \Delta I$  этого двухполюсника является отрицательной величиной, т.е. увеличению напряже-

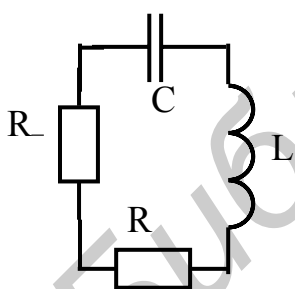


Рис. 1.20. Последовательное включение отрицательного сопротивления в колебательный контур

ния соответствует уменьшению тока. В этом случае двухполюсник не потребляет, а отдает энергию во внешнюю цепь. Заметим, что двухполюсник проявляет свойства отрицательного сопротивления только по отношению к переменным токам и напряжениям.

Простейшим примером генератора с отрицательным сопротивлением может служить LC-генератор на туннельном диоде (рис. 1.19).

Данный генератор можно представить в виде колебательного контура с введенным в него отрицательным сопротивлением, которое можно подключить к контуру либо последовательно (рис. 1.20), либо параллельно (рис. 1.21).

Получим основные соотношения, связывающие величины отрицательного сопротивления с параметрами колебательной системы автогенератора.

При последовательном включении отрицательного сопротивления в контур (см. рис. 1.20) для компенсации потерь или создания колебаний с возрастающей амплитудой (отрицательное затухание) необходимо, чтобы  $|R_-| \geq R$ , где  $R$  – сопротивление потерь в колебательном контуре. Иными словами, отрицательное сопротивление по своей абсолютной величине равно сопротивлению потерь контура или больше его. В установившемся режиме должно иметь место равенство

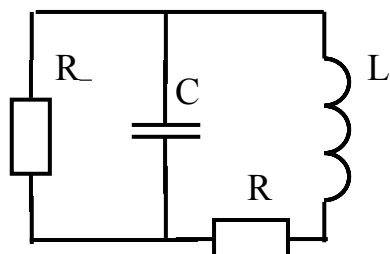


Рис. 1.21. Параллельное включение отрицательного сопротивления с колебательным контуром

$$|R_-| = R,$$

что автоматически достигается за счет нелинейности системы в целом.

Параллельное включение отрицательного сопротивления (см. рис. 1.21) позволяет пересчитать отрицательное сопротивление  $R_-$  в контур, т.е. заменить параллельно включенное  $R_-$  последовательно включенным  $R'_- = L/RC$ . Тогда должно иметь место соотношение

$$|R'_-| \leq Z_{к.р.},$$

из которого следует

$$|R'_-| \leq L/RC.$$

Следовательно, для возбуждения и поддержания колебаний в контуре параллельно присоединенное отрицательное сопротивление должно быть по абсолютной величине меньше или равно эквивалентному резонансному сопротивлению контура. Знак равенства здесь также соответствует установившемуся режиму.

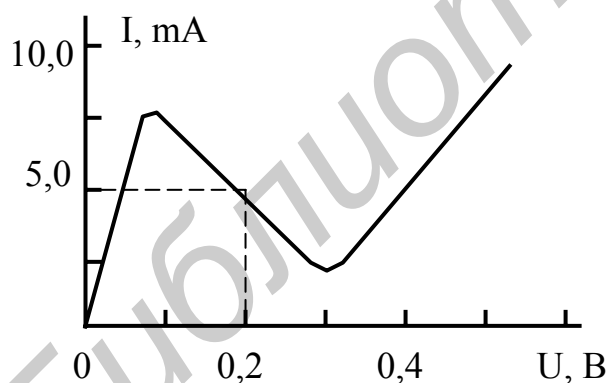


Рис. 1.22. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

**Пример 1.7.** Автогенератор собран на туннельном диоде, вольт-амперная характеристика которого приведена на рис. 1.22. Рабочая точка выбрана на середине падающего участка вольт-амперной характеристики туннельного диода. Индуктивность колебательного контура генератора  $L=5$  мкГн, сопротивление потерь составляет 5 Ом. Оценить величину емкости контура  $C$ , при которой в схеме будут возбуждаться автоколебания.

Для расчета величины емкости  $C$  колебательного контура генератора сначала представим схему автогенератора на туннельном диоде в виде эквивалентной схемы, показанной на рис. 1.20, из которой видно, что можно воспользоваться соотношениями между отрицательным сопротивлением и параметрами колебательного контура.

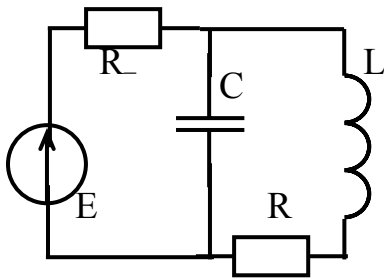


Рис. 1.23. Эквивалентная схема генератора на туннельном диоде

Оценим величину отрицательного сопротивления в рабочей точке туннельного диода. Из характеристики, приведенной на рис. 1.22, находим

$$R_- = \Delta U / \Delta I = 0,2/5 \cdot 10^{-3} = 40 \text{ Ом.}$$

Условием возникновения колебаний в автогенераторе с внутренней обратной связью является  $|R_-| \leq L/RC$ . Отсюда находим, что должно быть  $C < L/R \cdot R_-'$ , т.е.  $C < 0,25 \cdot 10^{-7} \text{ Ф.}$

**Пример 1.8.** Найти величины резисторов  $R_1$  и  $R_2$  в схеме автогенератора на туннельном диоде (рис. 1.19), при которых выполняется условие самовозбуждения и обеспечивается устойчивость стационарного режима генератора. Заданы параметры схемы генератора  $C=50 \text{ пФ}$ ,  $Q=100$ ,  $L=0,2 \text{ мкГн}$ ,  $E=1,5 \text{ В}$ . Характеристика диода соответствует приведенной на рис. 1.22.

Для устойчивой работы генератора, изображенного на рис. 1.19, необходимо выполнение условия  $|R_-| \leq Z_{к.р} = L/RC = \rho Q$ , где  $\rho$  – волновое сопротивление контура. Из вольт-амперной характеристики находим величину отрицательного сопротивления в рабочей точке  $|R_-| = 40 \text{ Ом}$ ,  $Z_{к.р} = 64 \text{ кОм}$ . Обычно принимают  $|R_-| = (0,3 \dots 0,5) Z_{к.р}$ . В рассматриваемом случае  $Z_{к.р} \gg |R_-|$ , поэтому для согласования  $Z_{к.р}$  с величиной  $|R_-|$  нужно использовать неполное включение колебательного контура.

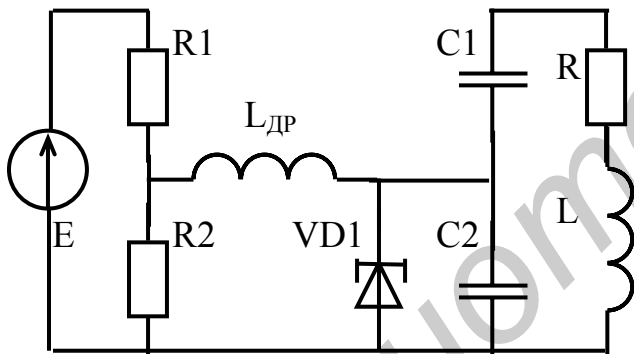


Рис. 1.24. Схема генератора на туннельном диоде с неполным включением контура

Оценим величину коэффициента включения колебательного контура  $\rho = \sqrt{3 |R_-| / Z_{к.р}} \approx 0,14$ . Схема генератора примет вид, показанный на рис. 1.24. Учитывая, что суммарная емкость контура не должна измениться, находим  $C_1 C_2 / (C_1 + C_2) = 50 \text{ пФ}$ , откуда  $C_1 = 58 \text{ пФ}$ ,  $C_2 = 360 \text{ пФ}$ .

Для обеспечения устойчивого положения рабочей точки на падающем участке характеристики диода необходимо выполнение условия  $|R_-| > R_{\text{вн}}$ , где  $R_{\text{вн}}$  – внутреннее сопротивление эквивалентного источника.

Для выбора сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  заменим схему делителя с источником питания эквивалентной схемой, показанной на рис. 1.25. Если выбрать рабочую точку посередине падающего участка вольтамперной характеристики, то статическое сопротивление туннельного диода в рабочей точке будет  $R_{\text{ст}} = 0,15/5 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ Ом}$ .

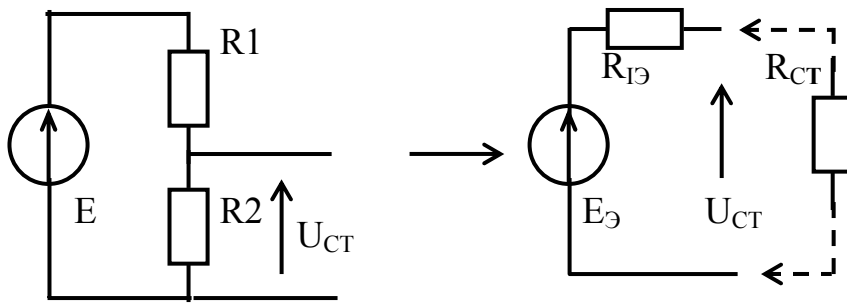


Рис. 1.25. Эквивалентная схема делителя с источником питания

При выполнении условия  $R_{ст} \gg R_{1э}$  напряжение на диоде будет близко к напряжению источника, а именно  $U_{см} \approx E_э = 0,15 \text{ В}$ .

Принимая в данном случае величину  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ , находим  $R_1 = R_2(E - E_э)/E_э = 20 \text{ Ом}$ .

Для определения индуктивности дросселя  $L_{др}$  воспользуемся условием  $\omega L_{др} \gg R_э = r^2 \rho Q$ .

**Пример 1.9.** Найти амплитуду стационарных колебаний на контуре генератора с туннельным диодом (рис. 1.24) с параметрами схемы, приведенными в примере 1.8.

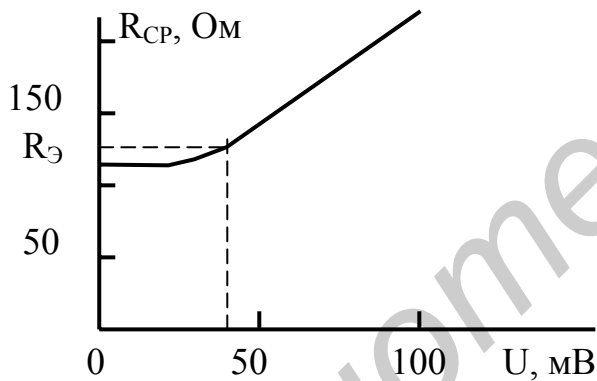


Рис. 1.26. Зависимость среднего сопротивления диода от амплитуды напряжения

Найдем зависимость амплитуды первой гармоники тока через туннельный диод от амплитуды напряжения методом трех ординат, для чего зададимся различными значениями амплитуд относительно рабочей точки.

При этом амплитуду первой гармоники будем вычислять по соотношению  $I_{m1} = (I_{max} - I_{min})/2$ . По найденным значениям  $I_{m1}$  построим зависимость среднего сопротивления диода  $R_{ср} = U/I_{m1}$  от амплитуды напряжения (рис. 1.26). Точке пересечения этой прямой  $R = R_э = 124 \text{ Ом}$  соответ-

ствует стационарная амплитуда колебаний, равная 40 мВ.

**Пример 1.10.** Провести анализ работы генератора на отрицательном сопротивлении при различных случаях положения нагрузочной прямой на вольт-амперной характеристике туннельного диода.

Изменяя величину источника питания схемы генератора, приведенной на рис. 1.15, изобразим положения 1, 2 и 3 нагрузочной прямой на вольт-амперной характеристике туннельного диода, когда нагрузочная прямая пересекается только в одной точке с вольт-амперной характеристикой диода (рис. 1.27).

**Положение 1 нагрузочной прямой.** В данном случае внутреннее сопротивление диода является положительным. Увеличив с помощью запускающего



импульса ток через нелинейный элемент до величины  $I_{\max}$ , можно создать в схеме скачок напряжения и задать направление движения изображающей точки по фазовой траектории в сторону второго восходящего участка вольт-амперной характеристики. Однако через один цикл движения точка снова вернется в положение А, соответствующее особой точке системы, так как в точке 1 фазовая скорость становится равной нулю и перемещение изображающей точки заканчивается. Такой режим колебаний соответствует режиму работы ждущего релаксационного генератора. Во время релаксации  $u_1 > u_2$ , т.е. формируется положительный импульс выходного напряжения.

*Положение 2 нагрузочной прямой.* Нагрузочная прямая пересекает вольт-амперную характеристику в точке В, лежащей на участке отрицательного сопротивления, где  $R_i < 0$ . Характер особой точки зависит от величины  $R_i$ . Если  $|R_i| > R$  и при этом  $|R_i| < L/RC$ , то точка В является неустойчивым узлом или фокусом. Поскольку эта точка единственная, в установившемся режиме изображающая точка должна перемещаться по устойчивому предельному циклу. В схеме генератора существуют периодические релаксационные или гармонические колебания. В том случае, когда индуктивность  $L$  велика, а паразитная емкость  $C$  мала, возникают релаксационные колебания.

Пусть в начальный момент изображающая точка совпадает с точкой  $A_0$ . Так как эта точка находится выше графика  $I = f(U)$ , то направление движения в указанной точке представляет собой горизонтальное движение в указанном на рис. 1.28 направлении вправо от оси координат. Изображающая точка перемещается до пересечения со вторым восходящим участком вольт-амперной характеристики диода, на котором направление движения изменяется, т.е. изображающая точка смещается вниз.

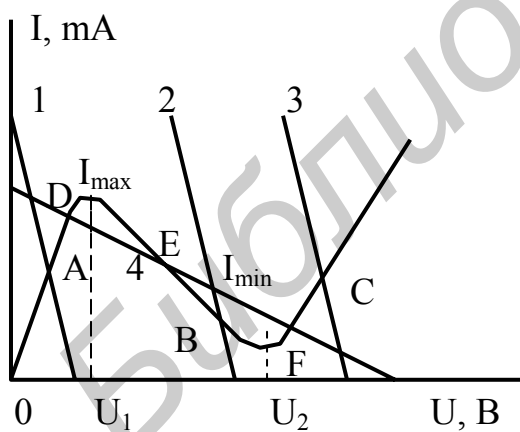


Рис. 1.27. Случаи взаимного расположения нагрузочной прямой и вольт-амперной характеристики диода

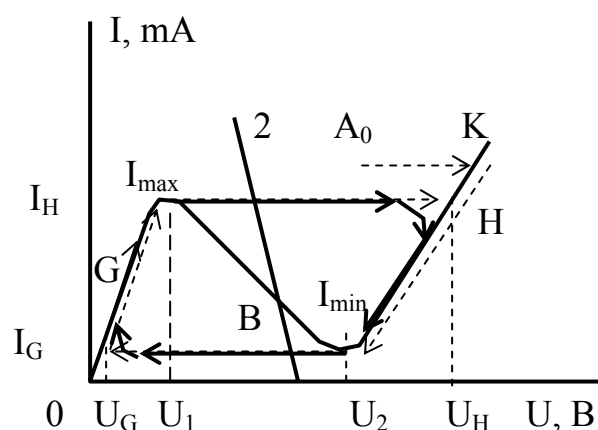


Рис. 1.28. Развитие процессов в автогенераторе, когда изображающая точка находится в положении  $A_0$

Когда изображающая точка сместится на бесконечно малую величину, она сможет дальше двигаться только по горизонтали влево. Поэтому изображающая точка не может оторваться от характеристики  $I = f(U)$  и движется по второму восходящему участку вольт-амперной характеристики вниз к точке с координатами  $(U_2, I_{\text{MIN}})$ . От этой точки изображающая точка перемещается в разрешенном направлении движения, т.е. по горизонтали влево, к точке пересечения с первым восходящим участком кривой  $I = f(U)$ . Однако перемещаться вверх она не может, так как стоит ей только переместиться на бесконечно малую величину по вертикали, разрешенное направление движения изменяется. Теперь изображающая точка может перемещаться только горизонтально в сторону первого восходящего участка вольт-амперной характеристики диода. Изображающая точка прижимается к характеристике и перемещается по ней до точки максимума с координатами  $(U_1, I_{\text{max}})$ . В этом месте изображающая точка отрывается от характеристики  $I = f(U)$  и перемещается в горизонтальном направлении до пересечения со вторым восходящим участком вольт-амперной характеристики. А затем начинает опускаться по этому участку.

Процессы в схеме автогенератора повторяются. Изображающая точка движется по устойчивому предельному циклу, охватывающему точки максимума  $(U_1, I_{\text{max}})$  и минимума  $(U_2, I_{\text{min}})$ . Независимо от положения точки  $A_0$ , т.е. от начальных условий существования системы, фазовая траектория скручивается в направлении к этому предельному циклу.

При начальных условиях  $U = 0, I = 0$ , предшествующих включению источника питания, изображающая точка совпадает с началом координат. В этом случае процессы в генераторе начинаются с перемещения изображающей точки по первому восходящему участку вольт-амперной характеристики до точки максимума  $(U_1, I_{\text{max}})$ .

Наличие горизонтальных участков на предельном цикле (рис. 1.28) свидетельствует о том, что при большой индуктивности  $L$  ток  $I$ , протекающий через нее, во время скачка напряжения остается неизменным. Например, при скачке напряжения от  $U_1$  до  $U_2$  ток в индуктивности остается равным  $I_{\text{max}}$ . В действительности же в силу конечного значения индуктивности  $L$  за время быстрого изменения напряжения на нелинейном элементе и паразитной емкости  $C$  ток  $I$  успевает несколько измениться, что и показано на рис. 1.28.

При малой индуктивности  $L$  горизонтальные участки предельного цикла вообще отсутствуют. В этом случае особая точка  $B$  превращается в точку типа центр. В системе наблюдаются гармонические колебания.

При  $|R_i| > L/RC$  особая точка  $B$  превращается в устойчивый фокус. Периодические колебания в такой системе невозможны.

При  $|R_i| < L/RC$  особая точка превращается в неустойчивый фокус изображающая точка, раскручиваясь из окрестностей точки  $B$ , после переходного процесса перемещается по замкнутому эллипсоидному циклу (рис. 1.29). Такой режим соответствует режиму квазигармонических колебаний в системе.

При  $|R_i| \ll L/RC$ , т.е. при большой индуктивности катушки, колебания в системе будут релаксационными, со скачками. Предельный цикл для таких колебаний показан на рис. 1.29.

Таким образом, при  $|r_0| \ll L/RC$ , где  $r_0 = R_i$  для участка отрицательного сопротивления, система работает как автоколебательный релаксационный генератор.

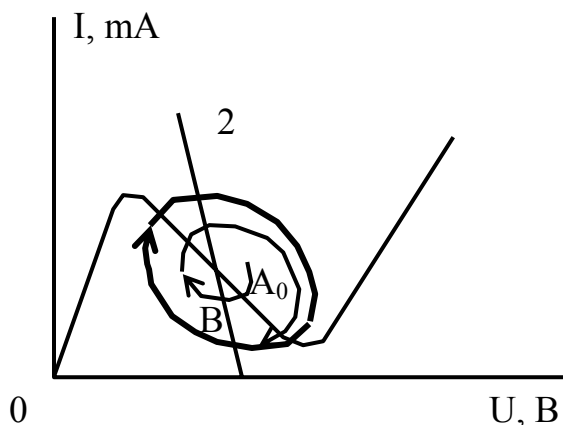


Рис. 1.29. Режим квазигармонических колебаний в схеме автогенератора на туннельном диоде

*Положение 3 нагрузочной прямой.* Особая точка находится в точке С (рис. 1.27) на втором восходящем участке вольт-амперной характеристике диода. Значение  $R_i$  положительно. Особая точка является устойчивой. Режим колебаний соответствует ждущему режиму работы релаксационного генератора. Уменьшив с помощью короткого запускающего импульса ток через нелинейный элемент от значения  $I_C$ , соответствующего ординате точки С, до значения  $I_{MIN}$ , можно создать релаксационный скачок напряжения в схеме. При этом изображающая точка начинает перемещаться в сторону первого восходящего участка

вольт-амперной характеристики. Однако после одного цикла движения изображающей точки по фазовой траектории она вернется в точку С и остановится в ней, так как здесь фазовая скорость равна нулю. Во время движения изображающей точки обеспечивается неравенство  $U < U_C$ , где  $U_C$  – абсцисса точки С. Следовательно, релаксатор после запуска формирует импульс напряжения отрицательной полярности.

*Положение 4 нагрузочной прямой.* Нагрузочная прямая пересекает вольт-амперную характеристику диода в трех точках – D, E, F. Точка D лежит на первом восходящем участке, точка E – на участке отрицательного сопротивления, точка F – на втором восходящем участке вольт-амперной характеристики. Ординаты точек D и F имеют значения  $I_D$  и  $I_F$  соответственно. Так как  $I_D < I_{max}$ , а  $I_F > I_{min}$ , то  $R > r_0$ . В точке E выполняются соотношения  $R_i = r_0 < 0$  и  $R > |r_0|$ . Это означает, что точка D является неустойчивой точкой типа седло.

В точках D и F  $dI/dU > 0$  и  $R_i > 0$ . Таким образом, точки D и F являются устойчивыми узлами или фокусами. После включения источника питания схема генератора оказывается в таком состоянии, когда изображающая точка попадает либо в точку D, либо – в точку F. Такой бистабильный режим соответствует режиму работы триггера. При положении 4 нагрузочной прямой анализируемая схема может работать как триггер.

### 1.10. Мягкий и жесткий режимы в автогенераторе

До сих пор мы говорили о возникновении колебаний в автогенераторе, не задумываясь о величине постоянного напряжения, приложенного к базе транзистора. Нас особенно не интересовал вопрос выбора положения рабочей точки на проходной характеристике транзистора. Тем не менее положение рабочей точки сильно влияет на режим самовозбуждения и работы автогенератора.

Различают мягкий и жесткий режим работы генератора. Мягкий режим получается, если рабочая точка находится в пределах линейного участка проходной характеристики транзистора, а жесткий – когда рабочая точка находится вне линейного участка характеристики (рис. 1.30).

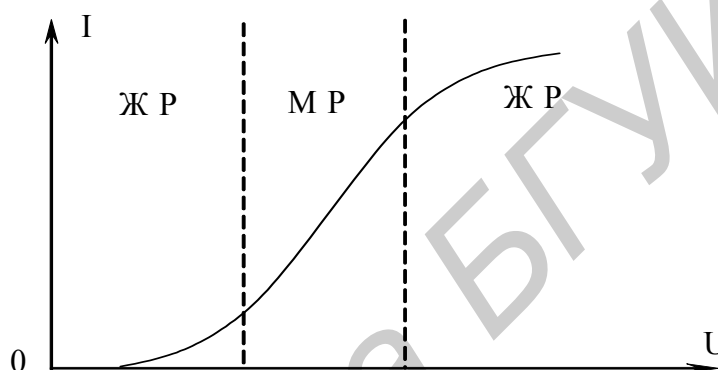


Рис. 1.30. Проходная характеристика транзистора и режимы в автогенераторе

Из рис. 1.30 мы видим, что:

- условия самовозбуждения в случае мягкого режима будут более благоприятны, так как в этом случае легче осуществить основное неравенство автогенератора,
- работа в мягком режиме оказывается менее выгодной с энергетической точки зрения.

С другой стороны:

- условия самовозбуждения в случае жесткого режима будут сильно затруднены из-за низкой величины крутизны проходной характеристики,
- работа генератора в жестком режиме отличается высокой энергетической эффективностью.

Отсюда легко сделать вывод о том, что целесообразно было бы разработать такие схемы автогенераторов, которые возбуждались бы в мягком режиме, а затем автоматически переходили в жесткий режим работы. К счастью, такие схемы уже разработаны и называются схемами с автоматическим смещением.

### 1.11. Схема автогенератора с автоматическим смещением

Схема генератора с автоматическим смещением приведена на рис. 1.31. В цепь базы транзистора включают цепь  $R_B C_B$ . Базовая цепь представляет про-

стейшую выпрямительную схему, в которой роль диода играет участок база-эмиттер, а нагрузочным резистором является  $R_B$ . На сопротивлении  $R_B$  от постоянной составляющей базового тока получается постоянное напряжение с положительной полярностью на базе транзистора, которое является напряжением смещения. Конденсатор  $C_B$  сглаживает пульсации и повышает постоянное напряжение до амплитудного значения напряжения на базе транзистора. Для того чтобы конденсатор выполнял свою роль, постоянная его разряда должна быть меньше периода генерируемых колебаний.

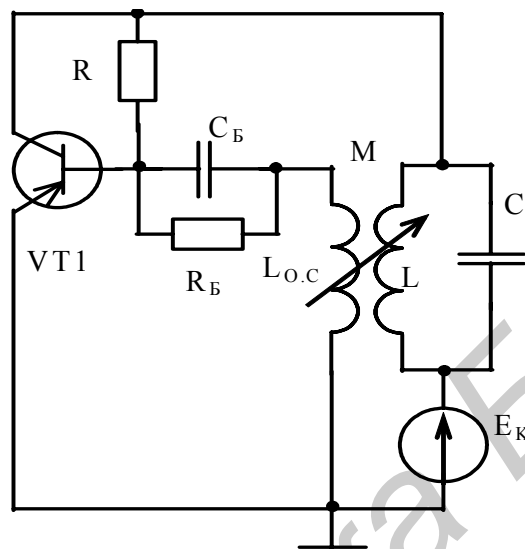


Рис. 1.31. Схема автогенератора с автоматическим смещением

В процессе получения базового смещения этим методом смещение автоматически возникает только тогда, когда на базу поступает переменное напряжение, и автоматически получается тем больше, чем больше амплитуда переменного напряжения на базе. Кроме того, цепь автоматического смещения оказывает стабилизирующее действие на всю схему автогенератора. Для нормальной работы цепи автоматического смещения надо обеспечить такое нарастание амплитуды переменного напряжения, которое согласовывалось бы с изменением напряжения смещения. Это достигается выбором величин  $R_B$  и  $C_B$ . Легко видеть, что если постоянная времени цепи автоматического смещения выбрана очень малой, то генератор будет возбуждаться в мягком режиме и останется работать в этом же режиме. Если же постоянная цепи автоматического смещения будет выбрана очень большой, то в схеме будет иметь место так называемая *прерывистая генерация* (рис. 1.32). При этом из-за инерционности цепи  $R_B C_B$  рост напряжения смещения отстает от увеличения амплитуды переменного напряжения на базе транзистора. Это приводит к тому, что при очень большой величине постоянной времени цепи автоматического смещения амплитуда напряжения на базе может достигнуть напряжения, превышающего стационарную амплитуду генерируемых колебаний. По мере роста напряжения смещения рабочая точка будет смещаться влево, а амплитуда переменного базового напря-

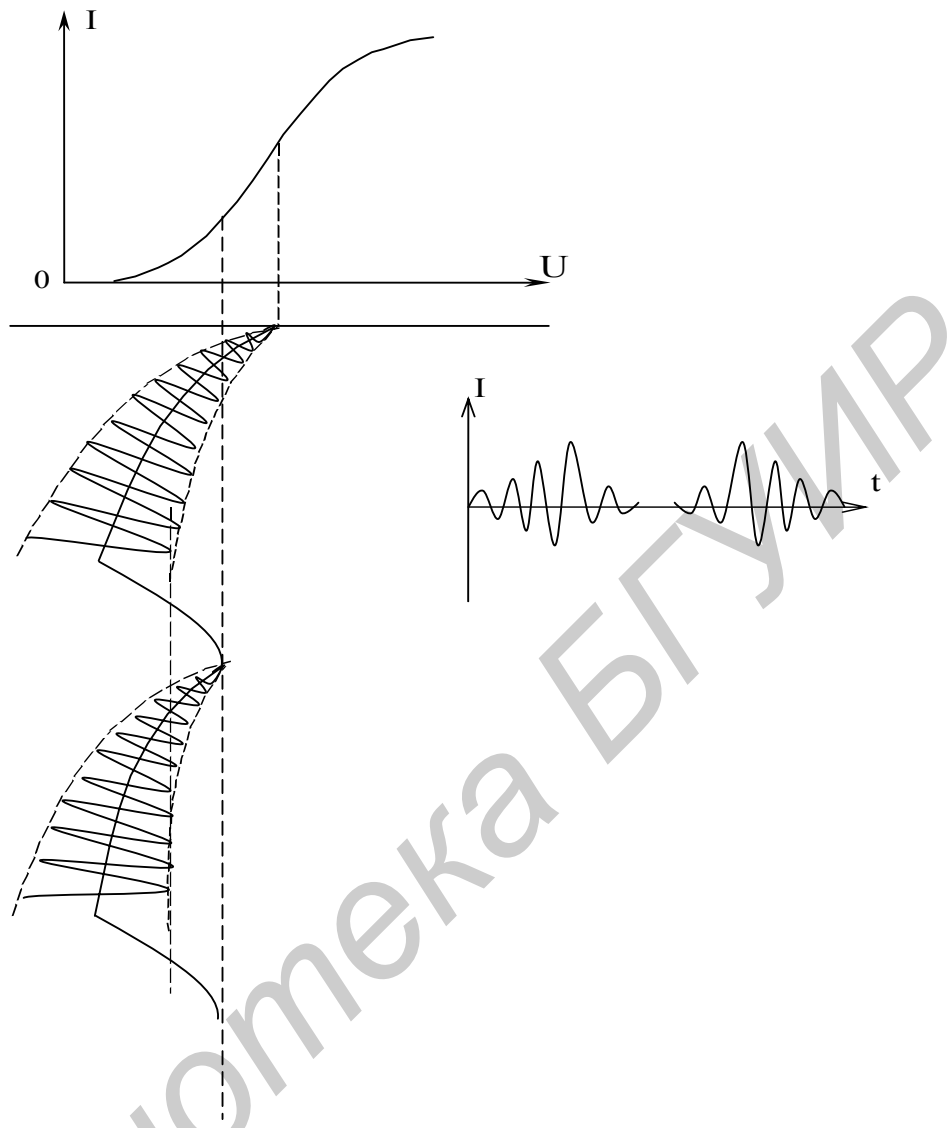


Рис. 1.32. Прерывистая генерация в схеме автогенератора

жения при стационарной амплитуде будет постепенно уменьшаться из-за снижения средней крутизны, причем рост отрицательного смещения не прекращается, а продолжается.

Это приводит к снижению  $S_{\text{CP}}$  до величины, меньшей, чем необходимо для устойчивой работы, и наступает срыв колебаний (рис. 1.32).

## 1.12. Графическое определение стационарной амплитуды генерируемых колебаний. Устойчивость стационарной амплитуды

### 1.12.1. Метод средней крутизны

Поставим задачу – найти амплитуду переменного напряжения, действующего на базе транзистора в стационарном режиме. Процесс стационарности описывается основным уравнением генератора

$$S_{CP} \geq \frac{1}{(k_{O.C} - D)Z_K}. \quad (1.12)$$

Отсюда по известным элементам схемы можно найти необходимую величину  $S_{CP}$ , но из этого условия нельзя найти амплитуду напряжения на базе транзистора. Однако  $S_{CP}$  является величиной постоянной в течение одного периода напряжения на базе, т.е. существует зависимость

$$S_{CP} = f(U_B). \quad (1.13)$$

Эту зависимость легко построить. Решим задачу качественно. Зависимость (1.13) имеет вид для мягкого и жесткого режимов, показанный на рис. 1.33.

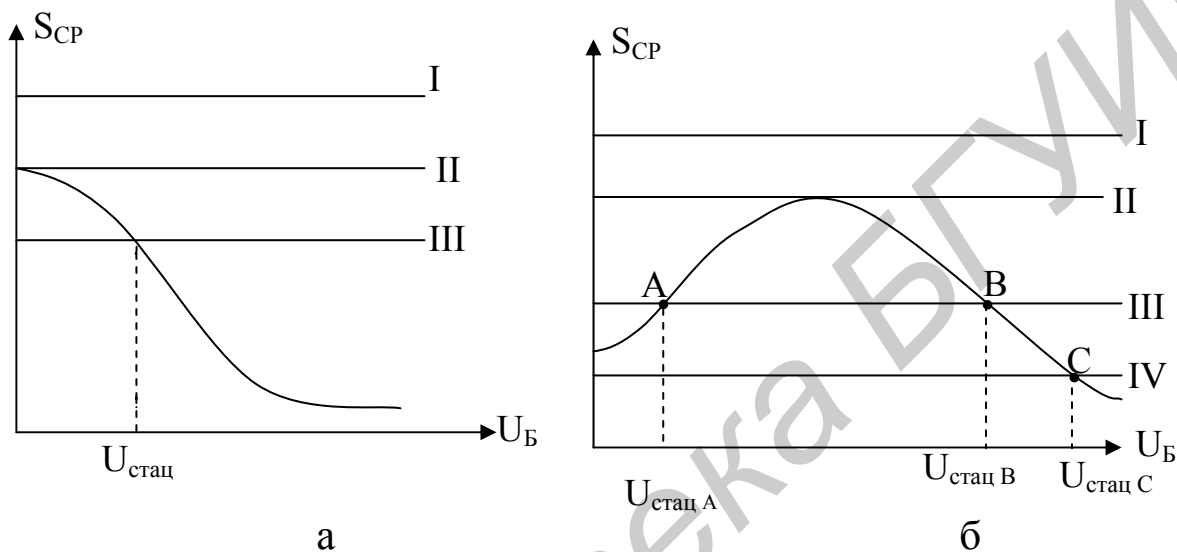


Рис. 1.33. Зависимость средней крутизны от напряжения возбуждения в мягком (а) и жестком (б) режимах

Для решения вопроса о величине стационарной амплитуды мы наносим на графике средней крутизны прямые линии обратной связи, т.е. решаем графически систему, состоящую из уравнений (1.12) и (1.13). Точка пересечения этих зависимостей определяет величину стационарной амплитуды и среднюю крутизну в установившемся режиме автоколебаний.

**Пример 1.11.** По данной проходной характеристике транзистора (рис. 1.34) построить кривую средней крутизны для генератора, работающего в (а) мягком и (б) жестком режимах.

Допустим, что получена экспериментально проходная характеристика транзистора (табл. 1).

Таблица 1

Данные для построения графика проходной характеристики транзистора

$U_B, В$	0,0	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6
$I_K, mA$	0,0	0,5	2,0	3,0	6,0	9,0	10,0	11,0	11,0

По данным табл. 1 построим график проходной характеристики (рис. 1.34). Мягкий режим автогенератора будет соответствовать положению рабочей точки на проходной характеристике с координатами (1, 6). Для этого случая проведем расчет значений средней крутизны.

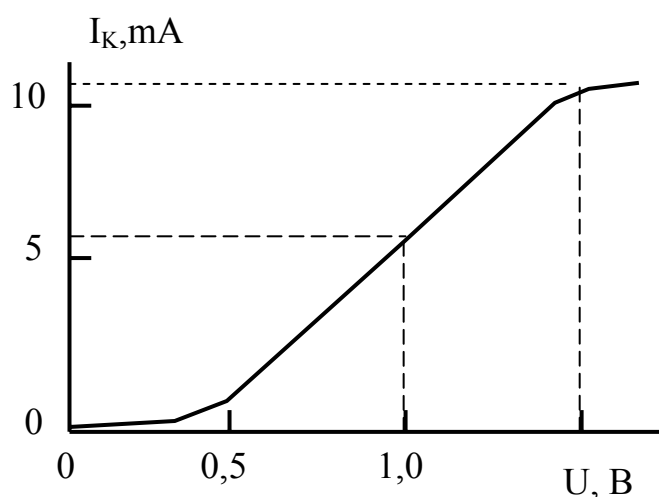


Рис. 1.34. График проходной характеристики транзистора

Сначала найдем амплитуды коллекторного тока для различных величин напряжения, действующего на базе транзистора, а затем вычислим соответствующие значения средней крутизны.

Итак, имеем

$$I_{m1}(0,2) = (I_{\max} - I_{\min})/2 = (9 - 6)/2 = 3 \text{ mA},$$

$$S(0,2) = I_{m1}/U_B = 3/0,2 = 15 \text{ mA/V}.$$

Для других значений базово-

го напряжения получим

$$I_{m1}(0,3) = 4 \text{ mA}, S(0,3) = 13,3 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(0,5) = 5 \text{ mA}, S(0,5) = 10 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(0,7) = 5,5 \text{ mA}, S(0,7) = 8 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(0,9) = 5,5 \text{ mA}, S(0,9) = 6 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(1,1) = 5,5 \text{ mA}, S(1,1) = 5 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(1,2) = 5,5 \text{ mA}, S(1,2) = 4,5 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(1,3) = 5,5 \text{ mA}, S(1,3) = 4 \text{ mA/V}.$$

По результатам расчета построим график средней крутизны для мягкого режима работы автогенератора (рис. 1.35).

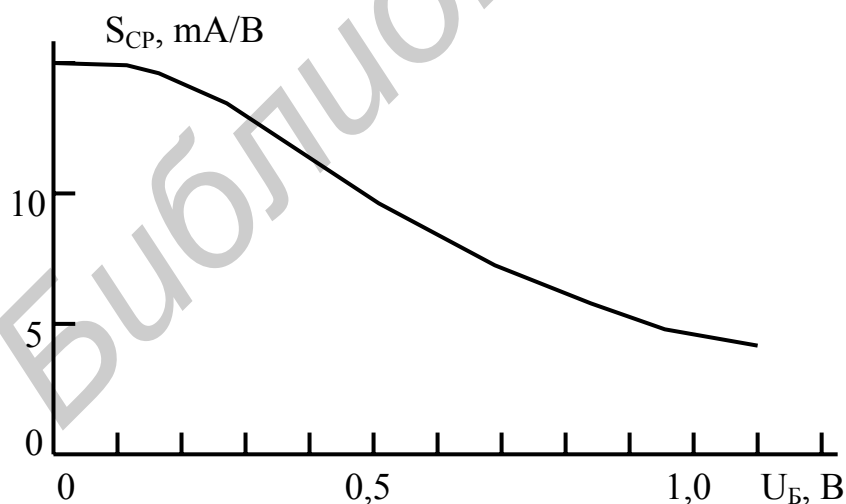


Рис. 1.35. Кривая средней крутизны для мягкого режима работы автогенератора

Чтобы получить данные для построения кривой средней крутизны для жесткого режима автогенератора, выберем положение рабочей точки на проходной характеристике транзистора с координатами (0,5, 0,5), расположенной на нижнем изгибе проходной характеристики транзистора.

Расчет значений средней крутизны про-



ведем аналогично той последовательности действий, которую мы избрали при расчете кривой средней крутизны для мягкого режима.

При напряжении  $U_B = 0,2$  В имеем

$$I_{m1}(0,2) = (I_{\max} - I_{\min})/2 = (2 - 0)/2 = 1 \text{ mA}, S(0,2) = I_{m1}/U_B = 1/0,2 = 5 \text{ mA/V}.$$

Продолжая расчеты по этим же формулам, получим:

$$I_{m1}(0,3) = 1,5 \text{ mA}, S(0,3) = 5 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(0,5) = 3 \text{ mA}, S(0,5) = 6 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(0,7) = 4,5 \text{ mA}, S(0,7) = 7 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(1,0) = 5,5 \text{ mA}, S(1,0) = 5,5 \text{ mA/V};$$

$$I_{m1}(1,6) = 5,5 \text{ mA}, S(1,6) = 3,5 \text{ mA/V}.$$

По полученным данным построим график кривой средней крутизны для жесткого режима автогенератора, показанный на рис. 1.36. Как видим, в жестком режиме этот график действительно имеет экстремум. Кроме того, общее поведение графика свидетельствует о значительно меньшей величине средней крутизны в жестком режиме по сравнению с величиной средней крутизны в мягком режиме.

Следует обратить внимание на расчет амплитуды первой гармоники коллекторного тока в жестком режиме. В этом случае гармоническое напряжение искажается сильнее, чем в мягком режиме. Однако благодаря фильтрующему действию колебательного контура эти искажения, представляющие собой высшие гармоники базового напряжения, не будут существенным образом влиять на форму генерируемых автогенератором гармонических колебаний.

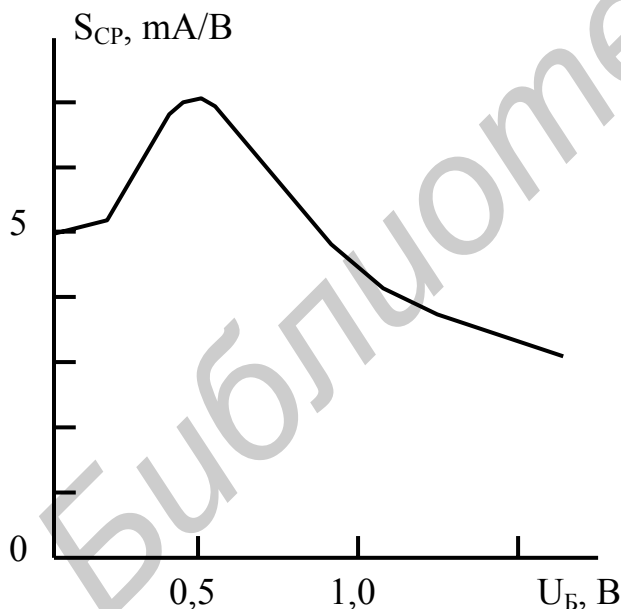


Рис. 1.36. График кривой средней крутизны для жесткого режима работы автогенератора

Графики полученных зависимостей являются основными при расчете амплитуды стационарных колебаний в схеме автогенератора. Для расчета амплитуды стационарных колебаний нужно построить на графике средней крутизны прямые на основании рассчитанных значений средней крутизны из основного неравенства генератора. Эти значения соответствуют значениям средней крутизны, которые устанавливаются в схеме генератора при стационарной амплитуде генерируемых колебаний. Если график средней крутизны пересечется с прямой, соответствующей значению средней крутизны, то координаты точки пересечения и дадут ответ на вопрос о

величине стационарной амплитуды генерируемых колебаний.

**Пример 1.12.** Найти выражение для средней крутизны, если характеристику транзистора можно аппроксимировать полиномом третьей степени:

$$I_K = a_0 + a_1 U_B + a_2 U_B^3.$$

Определить в общем виде знак коэффициента  $a_3$ , исходя из условия: при росте амплитуды напряжения, действующего на базе транзистора, крутизна характеристики должна уменьшаться. Полученную формулу для средней крутизны изобразить в виде графика и определить границы изменения амплитуды  $U_B$ , в которых эта формула имеет смысл.

Если к базе транзистора приложено напряжение  $U_B = U_m \cos \omega t$ , то для коллекторного тока получим

$$\begin{aligned} I_K &= a_0 + a_1 U_m \cos \omega t + a_3 (U_m \cos \omega t)^3 = \\ &= a_0 + (a_1 U_m + 3a_3 U_m^3/4) \cos \omega t + a_3 U_m \cos 3\omega t/4, \end{aligned}$$

откуда для первой гармоники коллекторного тока получаем

$$I_{m1} = a_1 U_m + 3a_3 U_m^3.$$

Теперь вычислим среднюю крутизну как отношение амплитуды первой гармоники коллекторного тока к амплитуде напряжения, действующего на базе транзистора:

$$S_{CP} = I_{m1}/U_m = a_1 + 3a_3 U_m^2/4 = a_1 - 3|a_3| U_m^2/4.$$

Из полученного выражения видно, что коэффициент  $a_3$  должен быть отрицательным. График зависимости средней крутизны от напряжения, действующего на базе транзистора, показан на рис. 1.36. Практически средняя крутизна при увеличении амплитуды всегда стремится к нулю. Найдем величину напряжения, при котором средняя крутизна обращается в нуль. Для этого составим уравнение

$$S_{CP} = a_1 - 3a_3 U_0^2/4 = 0.$$

$$\text{Отсюда } U_0 = (4a_1/3a_3)^{0,5}.$$

**Пример 1.13.** Условие самовозбуждения транзисторного генератора с контуром в цепи базы имеет вид  $S_{CP} > RC/M$ . Найти величину амплитуды стационарных колебаний, действующих на базе транзистора, если характеристику транзистора можно аппроксимировать полиномом третьей степени  $I_K = a_0 + a_1 u_B - a_3 u_B^3$ .

Уравнение стационарности в данном случае имеет вид

$$S_{CP} = a_1 - 3a_3 U_B^2/4 = RC/M,$$

откуда

$$U_{B.ст} = 2((a_1 - RC/M)/3a_3)^{0,5}.$$

### 1.12.2. Метод колебательных характеристик

Колебательной характеристикой называется зависимость амплитуды первой гармоники коллекторного тока от амплитуды переменного напряжения на базе транзистора. Эта зависимость снимается при разомкнутой обратной связи, т.е. когда генератор работает в режиме независимого возбуждения (как усилитель):

$$I_K = f(U_B). \quad (1.14)$$

Средняя крутизна за период

$$S_{CP} = \frac{I_K}{U_B}. \quad (1.15)$$

Тогда с учетом (1.12) имеем

$$I_K = \frac{1}{(k_{O.C} - D)Z_K} U_B. \quad (1.16)$$

Решая систему, составленную из уравнений (1.14) и (1.16), легко определить амплитуду стационарных колебаний. Графики колебательных характеристик для мягкого и жесткого режимов приведены на рис. 1.37.

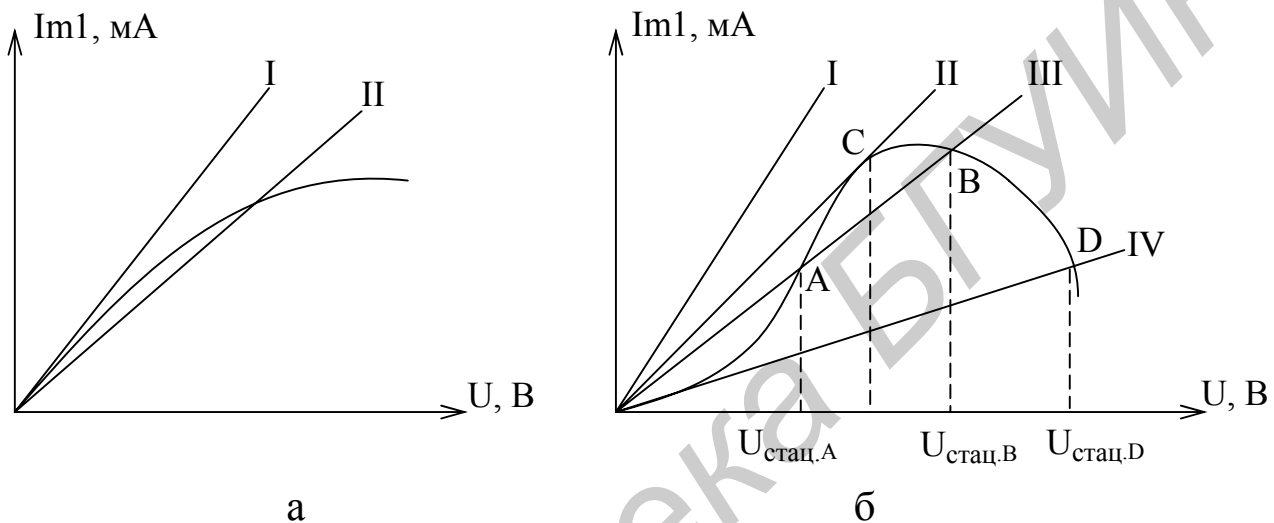


Рис. 1.37. Определение амплитуды стационарных колебаний методом колебательных характеристик

Уравнение (1.16) называется уравнением прямой обратной связи. Относительно графиков колебательных характеристик графики прямой обратной связи могут занимать различное положение. Характерно, что в случае двух стационарных амплитуд одна из них оказывается неустойчивой. Чтобы определить, какая из стационарных амплитуд является устойчивой, воспользуемся критерием устойчивости, сформулированным выше. Применяя этот критерий, приходим к выводу о том, что  $U_A$  является неустойчивой, а  $U_B$  – устойчивой стационарной амплитудой.

Для овладения этим методом расчета стационарной амплитуды рекомендуем читателям самостоятельно разобраться с решением следующего примера.

**Пример 1.14.** По данным о проходной характеристике транзистора (см. пример 1.13) построить колебательные характеристики для генератора, работающего в мягком и жестком режимах. Разобраться в механизме расчета стационарной амплитуды генерируемых колебаний по полученным колебательным характеристикам.

### 1.13. Зависимость тока в контуре от связи при различных режимах

Зависимость тока в контуре от связи при различных режимах иллюстрирует рис. 1.38. Если в генераторе с колебательной характеристикой, показанной на рис. 1.38, а, плавно изменять  $M$ , то, начиная с некоторого, называемого критическим, значения  $M_{кр}$ , амплитуда стационарного колебания станет плавно изменяться. Легко видеть, что кривая сохранит свой вид и при обратном уменьшении величины  $M$ , т.е. зависимость  $I_K = f(M)$  сохраняется как при увеличении связи, так и при ее уменьшении. Поэтому такой режим возбуждения и называется мягким.

В генераторе с колебательной характеристикой, показанной на рис. 1.38, б, колебания устанавливаются скачкообразно при некотором значении  $M_1$ , увеличиваются по амплитуде с дальнейшим увеличением  $M$ .

После того как колебания установились, связь можно ослаблять вплоть до величины  $M_2 < M_1$ , когда колебания срываются. Таким образом, при этом, называемом жестким, режиме возбуждения генератора вид кривой  $I_K = f(M)$  получается разным при увеличении и уменьшении связи. Если принудительное смещение выбрано настолько большим, что колебательная характеристика начинается не из нуля, то никакое увеличение обратной связи не может вызвать автоколебаний в схеме. Если же с помощью внешнего воздействия вызвать колебания, то при достаточно сильной обратной связи колебания могут сохраниться и после прекращения воздействия.

### 1.14. Стабильность частоты генерируемых колебаний

Автогенератор генерирует колебания той частоты, для которой выполняется условие баланса фаз, поскольку баланс амплитуд выполняется в достаточно широком диапазоне частот.

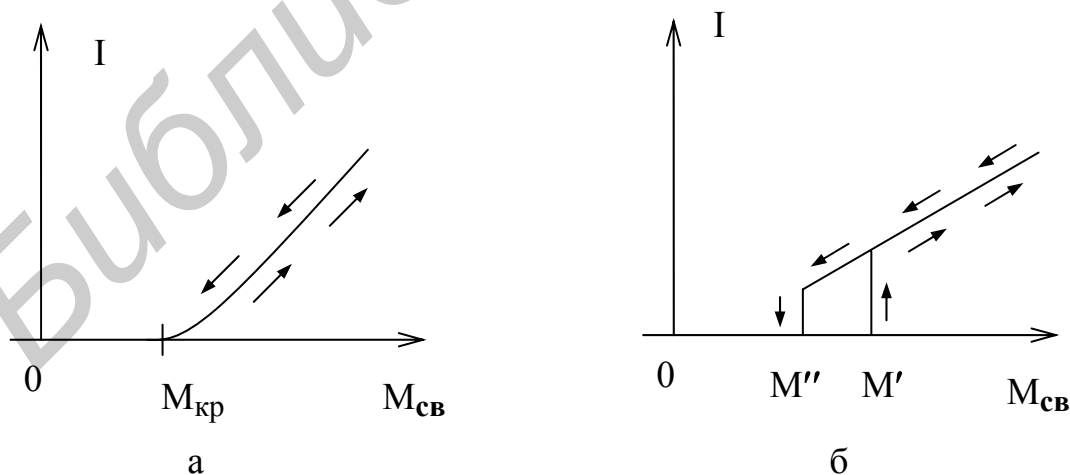


Рис. 1.38. Зависимость тока в контуре при различных режимах работы генератора

Относительный уход частоты автогенератора можно найти из уравнения фазочастотной характеристики колебательного контура:

$$\varphi(\Delta f) = -\operatorname{arctg}\left(\frac{2Q}{f_0}\Delta f\right),$$

где  $Q$  – добротность контура генератора,  $f_0$  – резонансная частота контура.

На частоту генерируемых колебаний могут оказывать влияние также посторонние источники колебаний, частота которых близка к  $f_0$ . Так, если к автогенератору подвести сигнал, амплитудное значение которого  $E_m$ , а частота изменяется, то в некотором интервале частот  $f' \dots f''$  вблизи частоты генерации  $f_0$  произойдет так называемое «захватывание». Генератор будет в указанном интервале частот генерировать колебания с частотой воздействующего сигнала. Ширина полосы «захватывания»  $2\Delta f_{\text{ЗАХВ}} \approx f' - f''$  при  $E_m \ll U_m$  равна

$$2\Delta f_{\text{ЗАХВ}} \approx E_m/U_m,$$

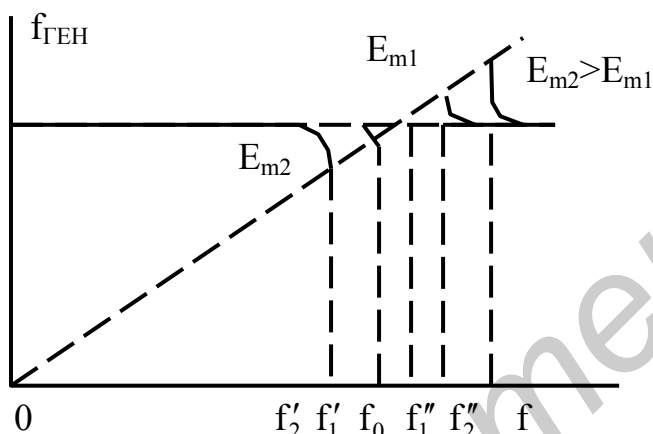


Рис. 1.39. Режим «захватывания» частоты в автогенераторе

где  $U_m$  – амплитуда генерируемых автогенератором колебаний в той точке схемы, к которой подведено напряжение  $E_m$ . Указанное явление иллюстрируется с помощью рис. 1.36. На графике этого рисунка по горизонтальной оси отложена частота воздействующего сигнала  $f$ , по вертикальной – значение частоты генератора  $f_{\text{ГЕН}}$ .

Рассмотренное явление может нарушать нормальную работу генераторов радиотехнических устройств, таких, например,

как гетеродины радиоприемников, задающие генераторы передатчиков и т.п. Однако оно может быть использовано для синхронизации частоты автогенераторов там, где это необходимо.

В заключение рассмотрим импульсный режим работы автогенератора, который имеет место, когда напряжение питания  $E_k$  имеет форму прямоугольных импульсов. При этом зависимость напряжения генерации на выходе автогенератора  $U_{\text{ВЫХ}} \approx f(t)$  не повторяет форму модулирующего напряжения. Форма и длительность переднего фронта генерируемого импульса определяется значением коэффициента связи  $k_{0,с}$ , а длительность заднего фронта полностью определяется скоростью затухания колебаний в контуре, т.е. величиной добротности  $Q$  контура автогенератора.

### 1.15. Описание схемы принципиальной электрической лабораторного макета

Схема принципиальная электрическая лабораторного макета приведена на рис. 1.40.

Генератор состоит из однокаскадного резонансного усилителя, собранного на транзисторе VT1. Нагрузкой транзистора является резонансный контур L2C4, настроенный на частоту  $f_0 \approx 550$  кГц. Добротность контура может изменяться с помощью переключателя S6. Цепь обратной связи представляет собой катушку индуктивности L1, которая может изменять свое расположение относительно катушки L2. Конструктивно катушки L1 и L2 выполнены в виде вариометра с катушкой L1, находящейся внутри катушки L2. При повороте катушки L1 в пределах угла величиной  $90^\circ$  изменяется величина коэффициента передачи цепи обратной связи  $k_{o.c.}$ , что обеспечивает выполнение баланса амплитуд, когда продольные оси катушек L1 и L2 почти параллельны друг другу, и не обеспечивает выполнение баланса амплитуд, когда они почти перпендикулярны.

Переключатель S3 позволяет проиллюстрировать выполнение и невыполнение баланса фаз в схеме генератора, так как изменяет полярность подключения катушки L1.

В лабораторной работе предусмотрено исследование принципиальной схемы автогенератора в трех модификациях, выбор которых осуществляется переключателем S3:

- в положении 1 генератор работает в режиме внешнего возбуждения (цепь обратной связи разорвана), т.е. как резонансный усилитель. При этом напряжение на вход усилителя подается от внешнего генератора через трансформатор Tr1;
- в положении 2 цепь обратной связи резонансного усилителя замыкается, и он превращается в автогенератор;
- в положении 3 исследуется процесс захватывания частоты исследуемого генератора; ко входу усилителя подключается как цепь обратной связи, так и вторичная обмотка трансформатора Tr1.

Смещение на базе транзистора VT1 может быть как фиксированным (при замкнутом переключателе S4), так и автоматическим, создаваемым с помощью цепочки R3C2 (переключатель S4 при этом разомкнут). Величина фиксированного смещения регулируется потенциометром R2 и измеряется вольтметром базового блока (положение 1 переключателя «Контроль напряжения»). Ток коллектора транзистора VT1 измеряется миллиамперметром базового блока (положение 1 переключателя «Контроль токов»), предел измерения 10 мА. Для создания дополнительного фазового сдвига в цепи обратной связи используется фазовращатель, в качестве которого используется линия задержки, подключаемая переключателем S2.

Выходное напряжение генератора снимается с клемм X4.1 или X4.2. Напряжение сигнала, подаваемого на вход резонансного усилителя, может измеряться с помощью вольтметра, подключаемого к клеммам X2.

К клеммам X3 подключается осциллограф для наблюдения формы импульсов тока коллектора.

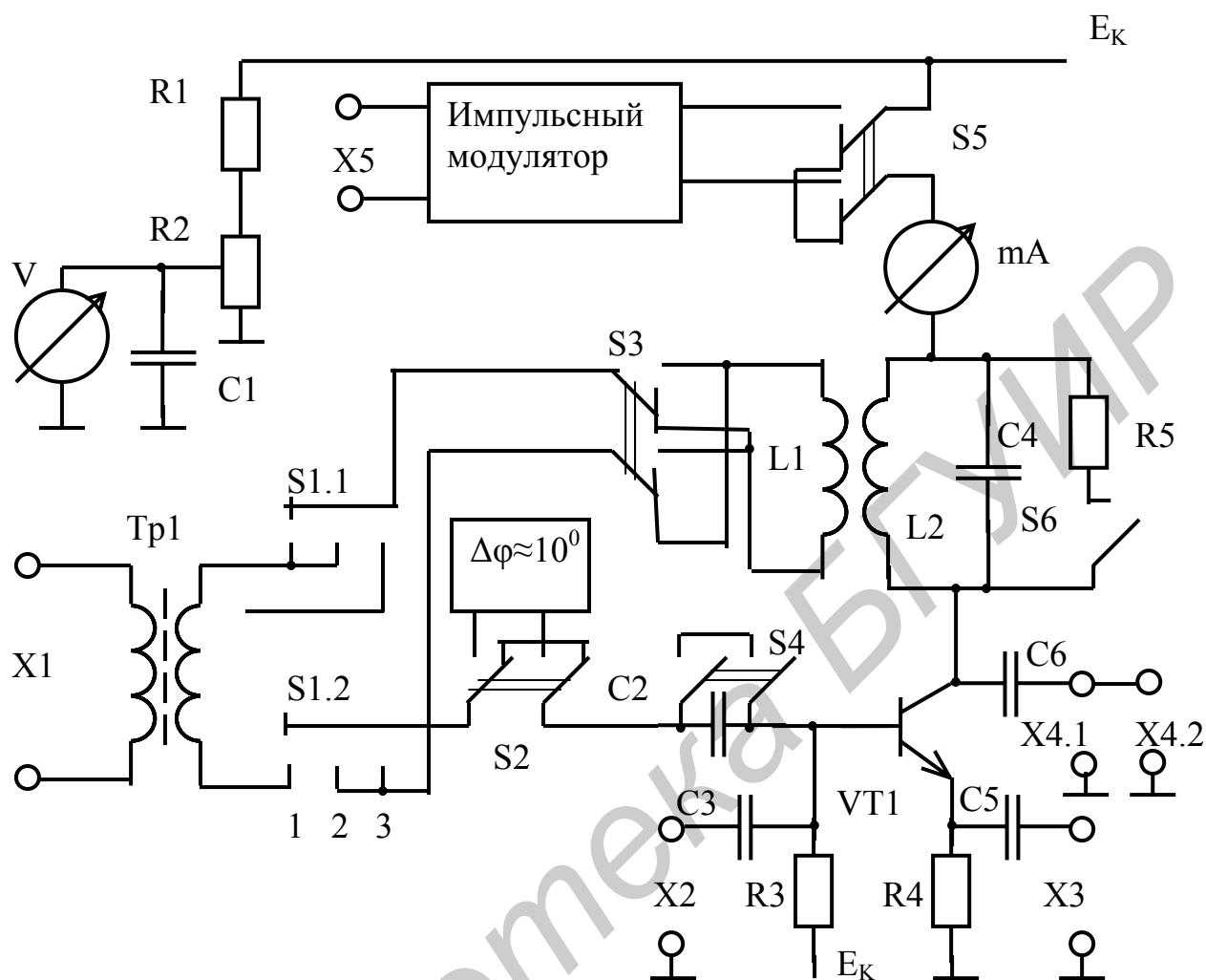


Рис.1.40. Схема принципиальная электрическая лабораторного макета

Импульсный режим работы автогенератора осуществляется с помощью модулятора, подключаемого переключателем S5. Регистрирующий осциллограф при этом может быть синхронизирован импульсами, снимаемыми с клемм X5.

### 1.16. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Включить лабораторный макет, установить напряжение питания, равное  $E_K = 9 \text{ В}$ .
2. Экспериментально снять необходимые данные и по ним построить проходную характеристику транзистора  $I_K = f(U_{БЭ})$ , используемого в автогенераторе.

При этом переключатели «Измерение токов» и «Измерение напряжений» базового блока поставить в положение 1, переключатель S1 – в положение 1,

переключатель S2 – вправо, S4 – влево, S3 – вниз, S5 – вниз. Напряжение смещения  $U_{БЭ}$  изменять потенциометром R2 через 0,05 В в пределах от 0 до 1,4 В.

3. Снять и построить амплитудно-частотные характеристики (АЧХ)  $U_{ВЫХ} = f(f)$  усилителя генератора при различных положениях переключателя S6. Для этого установить смещение  $U_{БЭ} = 1$  В; к клеммам X4.1 и X4.2 подключить электронный вольтметр и осциллограф. На вход макета (клеммы X1) подать сигнал с генератора Г4-117 величиной  $U_{ВХ} \approx 0,1$  В. Частоту генератора изменять в интервале 0,4...0,6 МГц. По АЧХ рассчитать полосу пропускания усилителя генератора и добротность контура.

4. Исследовать автогенератор в режиме самовозбуждения, установив переключатель S1 в положение 2.

Проверить выполнение баланса фаз. Для этого установить переключатель S3 вверх и обеспечить максимальную связь между катушками L1 и L2. Наблюдать колебания на выходе автогенератора с помощью осциллографа. Изменяя тумблером S3 варианты подключения катушки обратной связи, убедиться, что колебания в схеме автогенератора возникают только в верхнем положении переключателя S3. Оставить переключатель S3 в этом положении и в дальнейшем его *не переключать*.

Проверить выполнение баланса амплитуд. Предварительно убедиться, что колебания в автогенераторе возникают и исчезают лишь при определенной величине коэффициента передачи цепи обратной связи, зависящей от взаимного расположения катушек L1 и L2. При этом обратить внимание на то, что при зашунтированном контуре (S6 подключает резистор R5 параллельно колебательному контуру автогенератора) для возникновения генерации требуется большая связь между катушками L1 и L2. Объяснить результаты наблюдений. Перевести переключатель в правое положение.

5. Исследовать «мягкий» и «жесткий» режимы самовозбуждения и работы автогенератора.

5.1. «Мягкий» режим.

Установить напряжение смещения  $U_0 = 1$  В. Переключатель S1 установить в положение 1. Снять и построить зависимость коэффициента усиления усилителя генератора от величины выходного напряжения на резонансной частоте контура. При этом входное напряжение контролировать либо по аттенюатору прибора Г4-117, либо по вольтметру, подключенному к клеммам X2. Напряжение на входе менять через 0,05 В в пределах от 0 до 0,5 В.

Перевести S1 в положение 2, генератор Г4-117 отключить. Снять зависимость  $U_{ВЫХ}$  от угла поворота катушки L1, меняя угол поворота через каждые  $5 \dots 10^\circ$  отдельно для случая увеличения связи от нуля до максимума и отдельно для случая уменьшения связи в обратном направлении. Объяснить полученные результаты.

5.2. «Жесткий» режим.

На проходной характеристике транзистора, построенной в п.2, определить напряжение смещения  $U_0$ , соответствующее положению рабочей точки для работы генератора в «жестком» режиме, и установить его на макете. Про-



вести те же эксперименты, что и для мягкого режима. Объяснить полученные результаты.

5.3. Исследовать процесс самовозбуждения автогенератора при наличии автоматического смещения, переведя переключатель S4 в правое положение. Для этого проделать те же эксперименты, что и для «мягкого» режима. При снятии экспериментальных зависимостей отразить на графиках изменение тока коллектора транзистора. Объяснить полученные результаты.

6. Исследовать стабилизирующую способность контура автогенератора. Для этого выключить развертку осциллографа и подать на его вход «X» напряжение с генератора Г4-117. Измерить методом наблюдения фигур Лиссажу частоту генерируемых LC-генератором колебаний. Сигнал с выхода LC-генератора подать на вход «Y» осциллографа. Отрегулировать усиление каналов «X» и «Y» осциллографа так, чтобы на экране получился светящийся прямоугольник.

Изменяя частоту генератора Г4-117 в диапазоне 400...700 кГц, получить на экране неподвижный эллипс. В этом случае частота генерируемых LC-генератором колебаний равна частоте генератора Г4-117.

Ввести в цепь обратной связи дополнительный фазовый сдвиг, установив переключатель S6 в левое положение, и снова измерить частоту генерируемых колебаний. Вычислить уход частоты.

Зашунтировать контур сопротивлением R5, установив переключатель S6 в левое положение, и тем же образом измерить уход частоты при введении в цепь обратной связи дополнительного фазового сдвига. Объяснить полученные результаты. Перевести переключатели S2 и S6 вправо.

7. Исследовать процесс «захватывания» частоты автогенератора внешним генератором. Для этого перевести переключатель S6 в положение 3, осциллограф – в режим внутренней синхронизации. Получить на экране осциллограмму генерируемых колебаний. Подать на клеммы X1 сигнал с генератора Г4-117 величиной  $U \approx 0,2$  В. Изменяя плавно частоту генератора Г4-117, измерить полосу «захватывания». (Срыв синхронизации на границах полосы наблюдается в виде возникновения биений осциллограммы).

Измерить полосу «захватывания» частоты при напряжении синхронизации  $U \approx 0,4$  В. Отключить генератор Г4-117 от макета.

8. Исследовать импульсный режим работы автогенератора. Для этого переключить переключатель S1 в положение 2, переключатель S5 – в верхнее положение. Получить на экране осциллографа изображение генерируемого радиоимпульса.

Исследовать влияние на передний фронт величины коэффициента обратной связи, а на задний фронт – добротности колебательного контура.

### **1.17. Вопросы для самопроверки**

1. Какое радиотехническое устройство называется генератором?
2. В чем заключается разница между генератором с независимым возбуждением и автогенератором?
3. Какие типы автогенераторов вам известны?

4. Какие условия должны выполняться в автогенераторе, работающем в стационарном режиме?
5. В чем состоит суть понятий баланса амплитуд и баланса фаз?
6. Начертите схемы LC-генераторов с колебательным контуром в цепи коллектора, с колебательным контуром в цепи базы, емкостной и индуктивной трехточек.
7. Объясните процесс установления стационарного режима в автогенераторе после его включения.
8. Какие факторы определяют величину выходного напряжения генератора в стационарном режиме?
9. Как выбирается рабочая точка на проходной характеристике транзистора для случая «мягкого» и «жесткого» режимов самовозбуждения?
10. Объясните характер зависимостей  $U_{\text{ВЫХ}} = f(k_{\text{O.C}})$  для случаев «мягкого» и «жесткого» режимов возбуждения.
11. Почему в автогенераторе, работающем в «жестком» режиме, нельзя получить малое выходное напряжение?
12. С какой целью в LC-автогенераторах используют автоматическое смещение?
13. Как изменится форма колебаний в автогенераторе, если сделать  $k_{\text{O.C}}(\omega_0) \gg 1/|K(\omega_0)|$ , где  $k_{\text{O.C}}(\omega_0)$  – величина коэффициента обратной связи на частоте генерируемых колебаний  $\omega_0$ ,  $|K(\omega_0)|$  – модуль коэффициента передачи усилителя генератора на резонансной частоте?
14. Какие факторы оказывают наибольшее влияние на стабильность частоты генерируемых колебаний?
15. С какой целью в стабильных LC-автогенераторах используют высокодобротный колебательный контур?
16. Что такое «захватывание» частоты, полоса «захватывания»?
17. Какие факторы влияют на ширину полосы «захватывания»?
18. В каких случаях «захватывание» частоты является вредным, а в каких – полезным явлением?
19. Чем определяется длительность переднего фронта генерируемого радиоимпульса в автогенераторе, работающем в импульсном режиме?
20. Чем определяется длительность заднего фронта радиоимпульса, формируемого автогенератором, работающем в импульсном режиме?
21. Сможете ли вы определить, в «мягком» или в «жестком» режиме работает автогенератор лабораторного макета, если в качестве измерительного прибора используется только вольтметр переменного напряжения?

## 2. RC-ГЕНЕРАТОРЫ

Генераторы с колебательным контуром незаменимы как источники высокочастотных колебаний. Для генерирования низких частот (ниже 15...20 кГц) они неудобны, так как колебательный контур получается слишком громоздким и трудно перестраиваемым. Поэтому на этих частотах используют RC-генераторы.

### 2.1. Однокаскадная схема RC-генератора

Отличие этого генератора от обычного LC-генератора заключается в том, что вместо нагрузочного колебательного контура здесь применено обычное омическое сопротивление, а обратная связь осуществляется при помощи специального четырехполюсника, составленного из конденсаторов и резисторов. Для получения устойчивой генерации на какой-либо частоте необходимо, чтобы сумма фазовых сдвигов при обходе замкнутого кольца обратной связи равнялась  $2\pi$ , а коэффициент усиления транзистора являлся величиной, обратной коэффициенту обратной связи. Поскольку в схемах RC-генераторов нет избирательных цепей, то требования к выбору положения рабочей точки в таких генераторах являются очень жесткими. Положение рабочей точки в таких генераторах должно выбираться на середине линейного участка вольт-амперной характеристики (ВАХ) транзистора. Такие генераторы не могут генерировать чисто гармонические колебания, так как амплитуда генерируемых колебаний обязательно ограничивается нелинейностью ВАХ, поэтому и регулировка таких генераторов должна выполняться более тщательно: нужно внимательно следить за тем, чтобы ограничение сверху и снизу генерируемых сигналов было одинаковым.

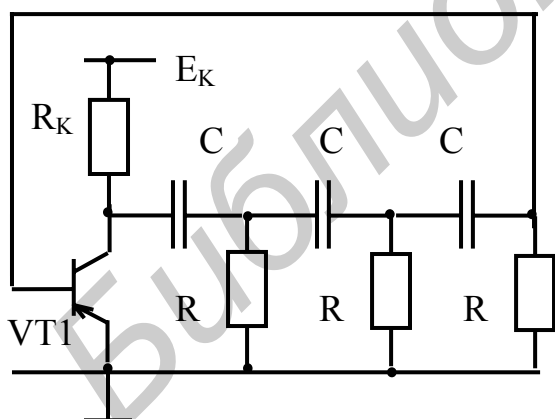


Рис. 2.1. Однокаскадная схема RC-генератора

Однокаскадный апериодический усилитель (рис. 2.1) осуществляет сдвиг фаз между входным и выходным напряжениями, равный  $180^\circ$ . Недостающие  $180^\circ$  для выполнения условия баланса фаз должен обеспечить четырехполюсник обратной связи, выделенный пунктирной линией на рис. 2.2.

**Пример 2.1.** В терминах квазилинейной теории получить условие самовозбуждения однокаскадной схемы RC-генератора и оценить частоту генерируемых колебаний.

Поскольку эквивалентная схема данного генератора (рис. 2.2) приводится к виду обобщенной, то для нее можно сразу же записать условие самовозбуж-

дения, полученное для обобщенной схемы автогенератора, анализ которого был проведен в рамках квазилинейной теории:

$$S_{CP} \geq \frac{1}{(k_{o.c} - D)Z_K}.$$

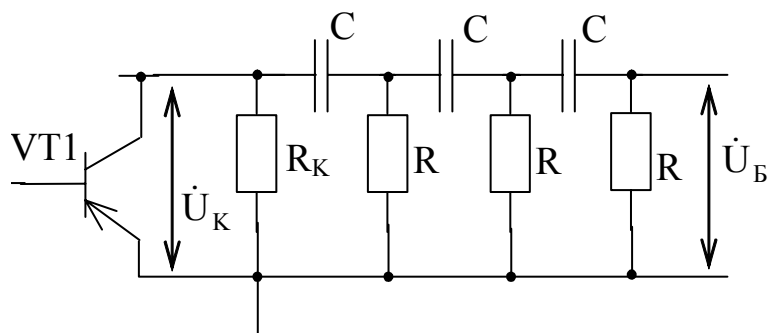


Рис. 2.2. Эквивалентная схема RC-генератора

Поскольку в реальных схемах  $R_K \ll R$ , то принимаем  $Z_K \approx R_K$ . Теперь надо определить величину коэффициента обратной связи. Поскольку

$$k_{o.c} = -\frac{\dot{U}_B}{\dot{U}_K},$$

$$\dot{U}_B = \dot{I}_3 R,$$

то

$$k_{o.c} = -\frac{\dot{I}_3 R}{\dot{U}_K}.$$

Теперь задача свелась к вычислению величины контурного тока  $\dot{I}_3$ . Для этого составим систему из трех уравнений с тремя неизвестными токами  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ :

$$\begin{cases} (R + \frac{1}{i\omega C})\dot{I}_1 - R\dot{I}_2 = \dot{U}_K, \\ -R\dot{I}_1 + (2R + \frac{1}{i\omega C})\dot{I}_2 - R\dot{I}_3 = 0, \\ -R\dot{I}_2 + (2R + \frac{1}{i\omega C})\dot{I}_3 = 0. \end{cases}$$

Величину тока  $\dot{I}_3$  найдем из выражения

$$\dot{I}_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta},$$

где

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} R + 1/i\omega C & -R & 0 \\ -R & 2R + 1/i\omega C & 0 \\ 0 & -R & 2R + 1/i\omega C \end{vmatrix} = \\ &= R^3 \left[ 1 - 5\frac{1}{\omega^2 RC} + i\left(\frac{1}{\omega^3 RC} - \frac{6}{\omega RC}\right) \right] = R^3 [1 - 5\alpha^3 + i(\alpha^3 - 6\alpha)]. \end{aligned}$$

Здесь вводится обозначение

$$\alpha = \frac{1}{\omega RC}.$$

Определитель

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} R + \frac{1}{i\omega C} & -R & \dot{U}_K \\ -R & 2R + \frac{1}{i\omega C} & 0 \\ 0 & -R & 0 \end{vmatrix} = \dot{U}_K (-1)^4 R^2 = \dot{U}_K R^2.$$

Для искомого тока получаем

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_K}{R} \frac{1}{1 - 5\alpha^2 + i(\alpha^3 - 6\alpha)}.$$

Подставляя полученное значение тока  $\dot{I}_3$  в выражение для коэффициента обратной связи, имеем

$$k_{o.c.} = \frac{1}{1 - 5\alpha^2 + i(\alpha^3 - 6\alpha)}.$$

Теперь можно составить выражение, определяющее условие самовозбуждения однокаскадной схемы RC-автогенератора:

$$S_{CP} \geq \frac{1}{\left(\frac{1}{1 - 5\alpha^2 + i(\alpha^3 - 6\alpha)} - D\right) R_K}.$$

Из условия баланса фаз

$$\alpha^3 - 6\alpha = 0$$

найдем частоту генерируемых колебаний  $\omega = \frac{1}{RC\sqrt{6}}$ .

Условие баланса амплитуд

$$S_{CP} \geq \frac{1}{\left(\frac{1}{5\alpha^2 - 1} - D\right) R_K} = \frac{1}{\left(\frac{1}{29} - D\right) R_K}.$$

Видим, что величина коэффициента обратной связи  $k_{o.c.} = 1/29$ , т.е. сигнал, пройдя четырехполюсник обратной связи, ослабевает в 29 раз. Это значит, что коэффициент усиления усилителя генератора должен быть не меньше 29, т.е.  $k_{yc} \geq 29$ .

Сформулируем порядок налаживания работы RC-генератора. Прежде всего нужно добиться генерирования колебаний. Для этого устанавливаем в коллекторную цепь достаточно большое по величине сопротивление коллекторной нагрузки. Колебания при этом всегда возбуждятся и, как правило, всегда будут иметь форму, сильно отличающуюся от синусоидальной. Затем выбираем

правильное положение рабочей точки. Она должна находиться на середине динамической проходной характеристики транзистора. Это сделать нетрудно, наблюдая на осциллографе момент, когда форма колебаний будет одинаково ограничиваться снизу и сверху. После этого нужно выбрать правильную величину коллекторного сопротивления, т.е. установить коэффициент усиления транзистора  $k_{yc} \geq 29$ .

## 2.2. Двухкаскадная схема RC-генератора

Двухкаскадная схема RC-генератора приведена на рис. 2.3. Необходимый для генерирования автоколебаний баланс фаз обеспечивается двумя ступенями усиления на сопротивлениях: каждый усилительный каскад поворачивает фазу колебания на  $180^\circ$ .

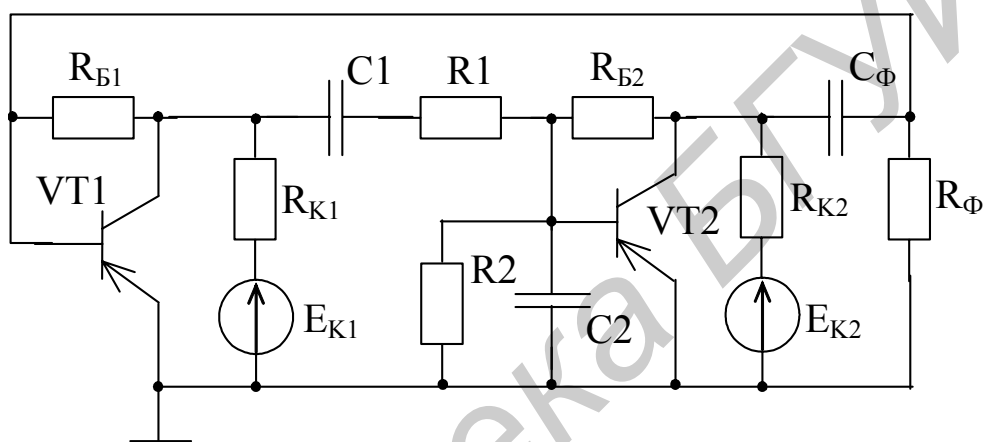


Рис. 2.3. Двухкаскадная схема RC-генератора

Назначение вспомогательной цепи  $C1R1C2R2$  заключается в том, чтобы обеспечивать выполнение баланса фаз на частоте генерации и нарушать его на всех других частотах. Емкость  $C_\Phi$  на выходе второго каскада выбирается настолько большой, чтобы на частоте генерации сопротивление конденсатора являлось очень малым по сравнению с сопротивлением резистора  $R_\Phi$ . Поэтому цепочка  $R_\Phi C_\Phi$  не создает заметного сдвига фаз.

**Пример 2.2.** Получить условия самовозбуждения в терминах квазилинейной теории автогенератора двухкаскадной схемы RC-генератора.

Представим схему двухкаскадного RC-генератора в виде обобщенной схемы (рис. 2.4), из которой следует, что условие самовозбуждения схемы можно записать в виде

$$S_{CP} \geq \frac{1}{(k_{o.c} - D)Z_K}.$$

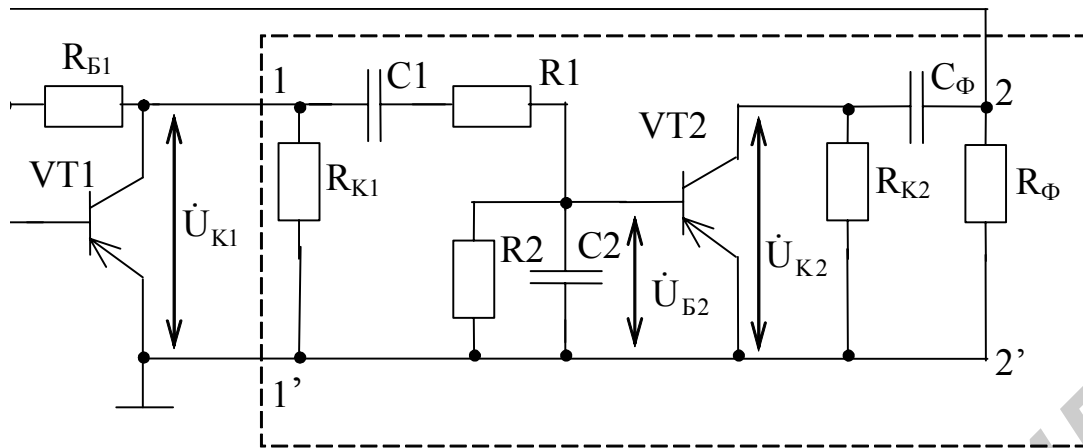


Рис. 2.4. Эквивалентная схема двухкаскадного RC-генератора

Легко видеть, что входное сопротивление четырехполюсника обратной связи  $Z_K \approx R_{K1}$ . Определим теперь величину коэффициента обратной связи

$$k_{o.c} = -\frac{\dot{U}_{B1}}{\dot{U}_{K1}} = -\frac{\dot{U}_{B1}}{\dot{U}_{B2}} \frac{\dot{U}_{B2}}{\dot{U}_{K1}}.$$

Так как

$$\frac{\dot{U}_{B1}}{\dot{U}_{B2}} = -|K_2|,$$

то

$$k_{o.c} = |K_2| \frac{\dot{U}_{B2}}{\dot{U}_{K1}},$$

и задача сводится к определению отношения  $\dot{U}_{B2}/\dot{U}_{K1}$ , поскольку  $|K_2|$  представляет собой не что иное, как коэффициент усиления второго каскада усилителя генератора.

$$\text{Из схемы легко видеть, что } \dot{U}_{B2}/\dot{U}_{K1} = Z_2/(Z_1 + Z_2) = \frac{1}{1 + Z_1/Z_2},$$

где  $Z_1 = R_1 + \frac{1}{i\omega C_1}$ , а  $\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2} + i\omega C_2$ .

Для коэффициента обратной связи получаем

$$k_{o.c} = \frac{|K_2|}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + i(\omega R_1 C_2 - \frac{1}{\omega R_2 C_1})}.$$

Условие самовозбуждения принимает вид

$$S_{CP} \geq \frac{1}{\left[ \frac{|K_2|}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1} + i(\omega R_1 C_2 - \frac{1}{\omega R_2 C_1})} - D \right] R_{K1}}.$$

Из условия баланса амплитуд

$$\omega R_1 C_2 - \frac{1}{\omega R_2 C_1} = 0$$

найдем частоту генерируемых колебаний:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}.$$

Условие возникновения колебаний следующее:

$$S_{CP} \geq \frac{1}{\left( \frac{|K_2|}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}} - D \right) R_{K1}}.$$

Если  $R_1 = R_2 = R$ ,  $C_1 = C_2 = C$ , тогда  $\omega = \frac{1}{RC}$ ,

$$S_{CP} \geq \frac{1}{\left( \frac{|K_2|}{3} - D \right) R_{K1}}.$$

Обсудим особенности RC-генераторов, сравнив их с LC-генераторами. Прежде всего отметим, что поскольку частота генерируемого RC-генератором колебания обратно пропорциональна емкости, а частота LC-генератора  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ , то можно сделать вывод, что одним и тем же конденсатором в схеме RC-генератора можно перекрыть более широкий диапазон частот, чем в схеме LC-генератора.

Легко видеть, что схема RC-генератора совершенно беззащитна относительно влияния на форму генерируемого колебания продуктов нелинейного усиления при их генерировании. Поэтому режим работы RC-генератора должен выбираться более тщательно, чем режим работы LC-автогенератора.

Для сохранения правильного режима работы RC-генераторы должны работать на большое нагрузочное сопротивление, т.е. являются источниками напряжения. Для получения значительной мощности RC-генератор обычно дополняется одной или двумя ступенями усиления.

Для уменьшения влияния цепи четырехполюсника на входное сопротивление усилительного каскада генератора используют включение эмиттерного повторителя между выходом четырехполюсника обратной связи и входом усилителя. Поскольку фаза выходного напряжения эмиттерного повторителя совпадает с фазой сигнала, поступающего на его вход, введение повторителя не сказывается на выполнении баланса фаз RC-генератора.



### 2.3. RC-генератор гармонических колебаний на операционном усилителе

Простейшая схема RC-генератора синусоидальных колебаний на операционном усилителе приведена на рис. 2.5. В качестве звена обратной связи использован полосовой RC-фильтр. Для выполнения условия баланса фаз выход звена обратной связи должен быть подключен к неинвертирующему входу операционного усилителя. Для выполнения условия баланса амплитуд операционный усилитель по неинвертирующему входу должен иметь коэффициент усиления, равный 3. Поэтому  $R1 = 2R2$ . В целом цепь, подключенная к операционному усилителю (полосовой фильтр и делитель  $R1R2$ ), называется мостом Вина-Робинсона. При строгом выполнении условия  $R1 = 2R2$  и идеальном операционном усилителе в схеме, приведенной на рис. 2.5, будут существовать незатухающие колебания с частотой  $f = 1/2\pi RC$ . Кроме того, даже незначительное уменьшение сопротивления  $R1$  по сравнению с требуемым вызовет затухание колебаний. Напротив, увеличение  $R1$  приведет к нарастанию амплитуды колебаний вплоть до насыщения усилителя и, как следствие этих процессов, к заметному искажению формы генерируемых колебаний. Таким образом, в схеме появляются нелинейные искажения формы кривой выходного напряжения генератора, что

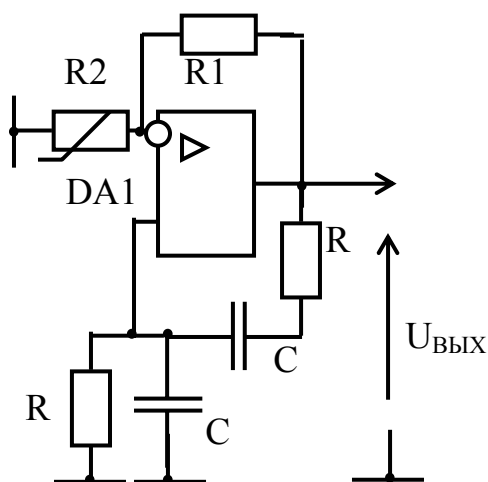


Рис. 2.5. Схема принципиальная электрическая RC-генератора на операционном усилителе

требует использования в схеме RC-генератора системы автоматического регулирования амплитуды генерируемых колебаний. В простейшем случае в качестве резистора  $R2$  используют нелинейный элемент, динамическое сопротивление которого с ростом амплитуды увеличивается.

### 2.4. Необходимость введения автоматической регулировки усиления в RC-генераторах

В отличие от LC-генераторов в RC-генераторах отсутствует фильтрация высших гармоник, неизбежно возникающих в нелинейной схеме. Для поддержания постоянной амплитуды выходного напряжения в эмиттерную цепь RC-генератора включают термосопротивление, т.е. сопротивление, изменяющее свою величину в зависимости от нагрева протекающим по нему током. При увеличении переменной составляющей эмиттерного тока (рабочая точка смещается при этом вправо) на эмиттерном сопротивлении увеличивается падение напряжения, что приводит к снижению напряжения между эмиттером и базой. Это ведет к снижению коллекторного, а следовательно, и эмиттерного тока, в результате чего рабочая точка смещается влево от первоначального положения.

Таким образом, получается автоматическая регулировка амплитуды генерируемых колебаний. Важно отметить, что при этом нелинейное сопротивление, обладая тепловой инерцией, не вносит нелинейных искажений в схему RC-генератора, т.е. не нарушает синусоидальную форму генерируемых колебаний. Пример схемы автогенератора со стабилизацией положения рабочей точки нелинейным резистором на сквозной динамической характеристике приведен на рис. 2.6.

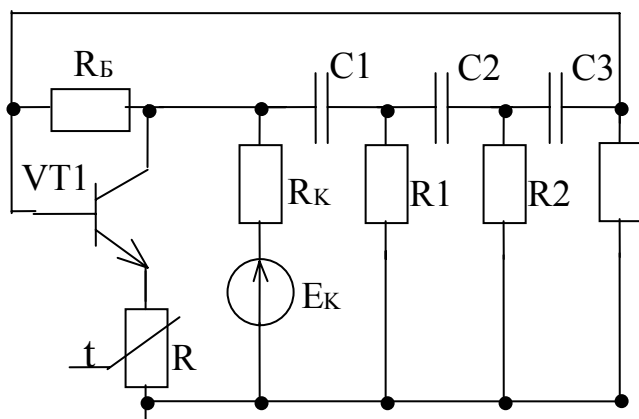


Рис. 2.6. Схема RC-генератора со стабилизацией положения рабочей точки нелинейным резистором на проходной динамической характеристике транзистора

Кроме этого метода использования инерционной нелинейности в эмиттерной цепи транзистора RC-генератора предусматривается схема автоматической регулировки и стабилизации уровня выходного напряжения.

Такая схема при увеличении выходного напряжения уменьшает коэффициент усиления таким образом, чтобы в автогенераторе установился стационарный режим при выходном напряжении, соответствующем линейному режиму работы усилителя. Одна из возможных схем автоматической регулировки и стабилизации уровня выходного напряжения автогенератора приведена на рис. 2.7.

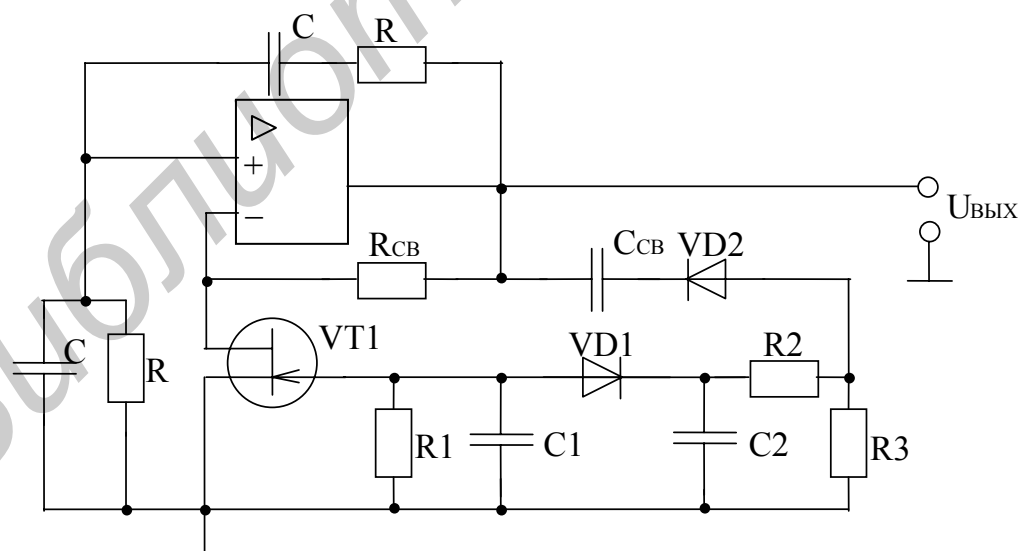


Рис. 2.7. Схема принципиальная электрическая RC-генератора с автоматической регулировкой амплитуды генерируемых автоколебаний

## 2.5. Описание схемы принципиальной электрической лабораторного макета RC-генератора

Схема принципиальная электрическая лабораторного макета RC-генератора приведена на рис. 2.8.

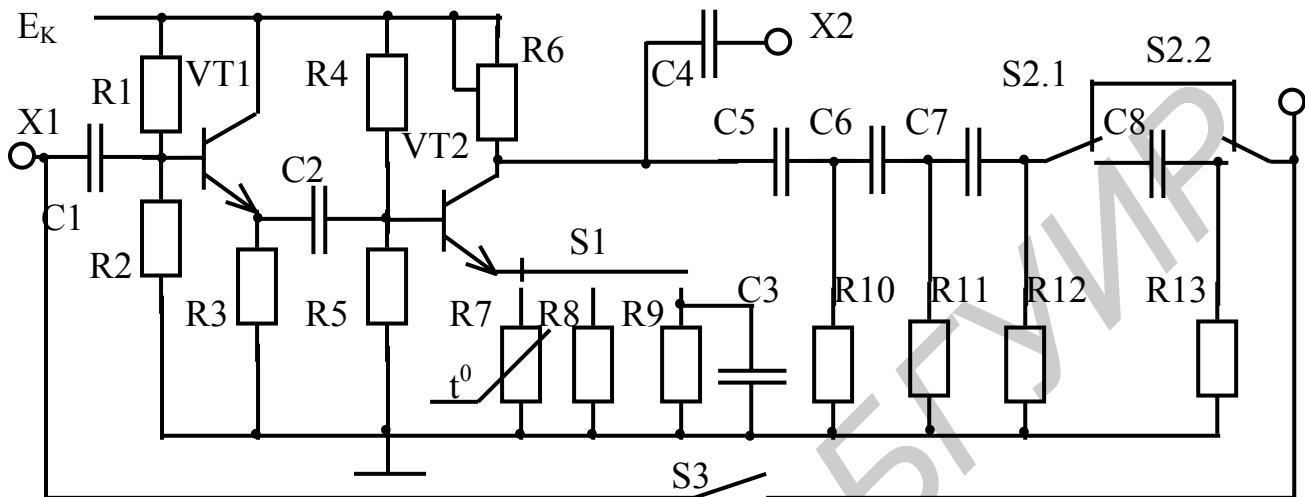


Рис. 2.8. Схема принципиальная электрическая лабораторного макета

Генератор состоит из однокаскадного усилителя, собранного на транзисторе VT2, с цепью обратной связи в виде многозвенного RC-фильтра высоких частот и эмиттерного повторителя, выполненного на транзисторе VT1.

Фазосдвигающая цепочка генератора может состоять либо из трех, либо из четырех RC-звеньев в зависимости от положения переключателя S2.

Коэффициент усиления усилительного каскада можно изменять путем варьирования величины коллекторной нагрузки (переменный резистор R6). Переключателем S1 производится подключение различных цепей к эмиттеру транзистора VT2: цепочки R9C3, резистора R8 или терморезистора R7.

Эмиттерный повторитель, имеющий входное сопротивление порядка 10...20 кОм, необходим для того, чтобы достаточно малое входное сопротивление усилительного каскада (порядка 1 кОм) не шунтировало фазовращающую цепочку. Переключатель S3 служит для отключения цепи обратной связи от входа усилителя.

## 2.6. Порядок выполнения работы

1. Рассчитать частоту генерации RC-генератора с многозвенным фильтром, состоящим из трех и четырех звеньев (рис. 2.8). Параметры элементов  $R_{10} = R_{11} = R_{12} = R_{13} = 10 \text{ кОм}$ ,  $C_5 = C_6 = C_7 = C_8 = 6800 \text{ пФ}$ .

2. Снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя RC-генератора с разомкнутой цепью обратной связи. Для этого переключатель

S1 поставить в положение 3, а к выходу усилителя (клеммы X2) подключить электронный вольтметр. С выхода генератора Г3111 подать на вход усилителя (клеммы X1) сигнал  $U_{ВХ} = 0,05$  В частотой 500 Гц. Переменным резистором R6 установить уровень выходного напряжения  $U_{ВЫХ} = 1,5$  В. Поддерживая величину входного напряжения постоянной, снять АЧХ усилителя в диапазоне частот 0,5... 3 кГц через 500 Гц.

Построить АЧХ усилителя и, зная коэффициенты передачи 3- и 4-звенной цепей обратной связи, приведенные в таблице, определить диапазон частот, в которых выполняются условия баланса амплитуд для RC-генератора с 3- и 4-звенным фильтром.

3. Снять экспериментально и построить графики амплитудных характеристик усилителя генератора. Для этого оставить ручку переменного резистора R6 и переключатели S1 и S3 в прежних положениях.

Установить на генераторе Г111 частоту генерации, найденную в п.1 для RC-генератора с 3-звенным фильтром. Подать сигнал с выхода генератора Г2-111 на вход усилителя X1. Изменяя величину входного сигнала от 0 до 0,3 В через 0,05 В, определить по вольтметру величину выходного напряжения усилителя на выходе X2. Рассчитать коэффициент усиления  $K = U_{ВЫХ}/U_{ВХ}$  для каждого значения входного и выходного напряжений. Построить амплитудную характеристику усилителя, т.е. зависимость  $K = f(U_{ВЫХ})$ , на данной частоте.

Аналогично снять и построить амплитудную характеристику усилителя на частоте генерации, рассчитанной в п.1 для RC-генератора с 4-звенным фильтром.

Зная коэффициенты передачи цепей обратной связи (см. табл.), по амплитудным характеристикам найти уровень выходного напряжения RC-генератора с 3- и 4-звенным фильтром в установившемся режиме.

4. Определить частоту, на которой фазовый сдвиг в цепи обратной связи RC-генератора соответствует выполнению условия баланса фаз.

Для этого, не изменяя положения ручки резистора R6 и переключателя S1, поставить переключатель S2 в положение, соответствующее 3-звенному фильтру. Сигнал с выхода X2 подать на вход «X», а сигнал с выхода X3 – на вход «Y» осциллографа. Выключить развертку осциллографа.

Подать на вход X1 сигнал от генератора Г3-111  $U_{ВХ}=0,05$  В на частоте 500 Гц. Поочередно отсоединяя кабели от входов «X» и «Y» осциллографа, отрегулировать ручками «Усиление» и «Синхронизация» усиление так, чтобы длины вертикальной и горизонтальной линий на экране осциллографа были примерно одинаковыми.

Изучить методику измерения фазового сдвига с помощью осциллографа по приложению, приведенному в конце данного пособия.

Плавно изменяя частоту генератора Г3-111, определить частоту, на которой фазовый сдвиг 3-звенного фильтра равен  $180^0$  (на этой частоте две кривые на экране осциллографа пересекаются примерно посередине).

Подключить четвертое звено RC-автогенератора и по методике, изложенной выше, определить частоту, соответствующую выполнению баланса фаз для этого случая.

Полученные значения частот сравнить с расчетными, найденными в п.1.

5. Экспериментально определить частоты генерации RC-генератора с 3- и 4-звенным фильтрами. Для этого ручку резистора R6 и переключатели S1 и S2 оставить в прежнем положении. Перевести автогенератор в режим самовозбуждения, замкнув цепь обратной связи (S3 в нижнем положении). Сигнал с выхода генератора (X2) подать на вход «Y», а сигнал с генератора ГЗ-111 – на вход «X» осциллографа (развертка выключена). Отрегулировать усиление по каналу «X» и «Y» осциллографа таким образом, чтобы на экране получился светящийся прямоугольник, занимающий 50...60 % площади экрана. Медленно изменяя частоту генератора ГЗ-111 вблизи частоты генерации, рассчитанной в п.1, получить на экране осциллографа неподвижный эллипс. Тогда частота генерируемых RC-генератором колебаний будет равна частоте сигнала генератора ГЗ-111. Подключить к выходу X2 RC-генератора электронный вольтметр и измерить величину выходного сигнала.

Аналогично определить частоту генерации и величину выходного сигнала для RC-генератора с 4-звенным фильтром.

Сравнить полученные данные с данными, найденными в предыдущих пунктах.

6. Исследовать влияние способа ограничения амплитуды выходного напряжения RC-генератора на форму колебаний.

Для этого переключатель S2 установить в нижнее положение. Переключатель S1 перевести в положение «1». Подключить к выходу генератора X2 вход «Y» осциллографа. Перевести RC-генератор в режим самовозбуждения (S3 замкнуть). С помощью резистора R6 добиться максимальной амплитуды выходного напряжения. Зарисовать полученную осциллограмму. Переводя переключатель S1 в положение «2» и «3», зарисовать осциллограммы. Объяснить результаты эксперимента.

## 2.7. Вопросы для самопроверки

1. В каком диапазоне частот используются RC-генераторы?
2. Чем ограничен рабочий диапазон частот RC-генератора «сверху» и «снизу»?
3. Каковы условия самовозбуждения RC-генератора?
4. Какое условие определяет частоту генерации RC-генератора?
5. Какие типы RC-генераторов вы знаете? В чем их отличие?
6. Какое число звеньев может иметь цепь обратной связи RC-генератора с многозвенным фильтром?
7. В каком случае будет работать RC-генератор с многозвенным фильтром, если усилитель имеет коэффициент усиления  $K = 20,5$ ?

8. Почему при увеличении числа RC-звеньев требуемый для работы генератора коэффициент усиления усилителя уменьшается?

9. Нарисуйте цепь обратной связи RC-генератора с двухкаскадным усилителем?

10. В каком из двух основных типов RC-генераторов легче получить колебания с малыми нелинейными искажениями,

11. Объясните, для чего в RC-генераторах на биполярных транзисторах применяется эмиттерный повторитель.

12. Укажите возможные причины отклонения частоты генерируемых колебаний RC-генератором от расчетных значений.

13. Чем определяется амплитуда колебаний RC-генератора в установившемся режиме?

14. Какими способами можно улучшать форму генерируемых колебаний RC-генератором колебаний?

15. Что такое «инерционная нелинейность»?

16. Какой вид должна иметь зависимость сопротивления в цепи эмиттера от амплитуды колебаний для транзистора, использованного в лабораторном макете?

17. С какой целью в схему RC-генератора вводят «инерционную нелинейность»?

18. Нарисуйте схему RC-генератора, перестраиваемого по частоте.

19. Каким образом выбирают положение рабочей точки транзисторов, используемых в RC-генераторах?

20. Как определить по амплитудной характеристике усилительных каскадов, используемых в RC-генераторе, стационарную амплитуду в режиме генерации?

### **3. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В АВТОГЕНЕРАТОРЕ НА ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ**

#### **3.1. Понятие фазового пространства**

Для изображения поведения различных систем во многих областях физических наук применяется метод фазового пространства, который является серьезным средством исследования нелинейных систем и заключается в следующем.

Если нелинейная система имеет  $n$  степеней свободы, надо задать  $2n$  чисел, т.е. точку в  $2n$ -мерном пространстве, чтобы описать поведение системы в любой момент времени. Под числом степеней свободы понимают число независимых координат, необходимых и достаточных для однозначного определения состояния системы.

Например, материальная точка  $M$  в 3-мерном пространстве имеет 6 степеней свободы. Чтобы описать движение этой точки, нужно задать шесть координат  $x, y, z, dx/dt, dy/dt, dz/dt$ . Значит, поведение материальной точки

можно представить совершающимся в 6-мерном пространстве. Наглядно представить это шестимерное пространство возможности нет. Это образ математического мира.

В том случае, если материальная точка движется в плоскости  $x, y$  ее движение описывается в 4-мерном пространстве координатами:  $x, y, dx/dt, dy/dt$ .

Если материальная точка может передвигаться только по прямой, то ее поведение можно описать в 2-мерном пространстве  $(x, dx/dt)$ , которое называется *фазовой плоскостью*.

**Пример 3.1.** Материальная точка совершает движение по закону  $x = a \sin \omega t$  (рис. 3.1). Изобразить поведение этой точки на фазовой плоскости.

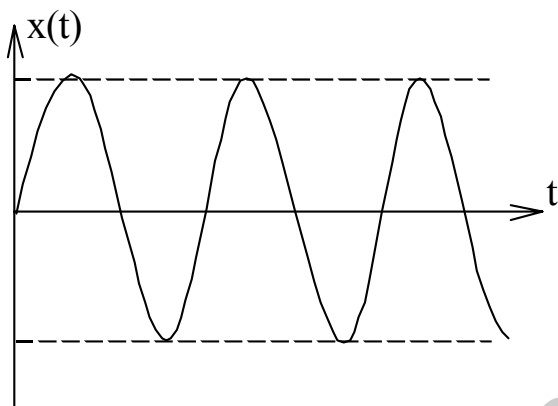


Рис. 3.1. Движение материальной точки по гармоническому закону

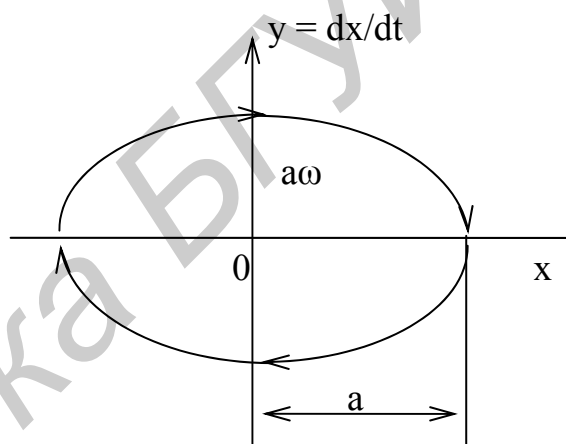


Рис. 3.2. Фазовый портрет движения материальной точки

Координаты фазового пространства:  $x = a \sin \omega t$  и  $y = dx/dt = a \omega \cos \omega t$ . Исключив из этих уравнений время, получим движение по эллипсу (рис. 3.2)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{(a\omega)^2} = 1.$$

Таким образом, колебательное движение  $x(t) = a \sin \omega t$ , совершающееся в обычном одномерном пространстве, описывается движением в двухмерном пространстве в виде эллипсов, построенных с учетом ортогональности осей этого пространства.

**Пример 3.2.** Материальная точка совершает движение по закону  $x = a e^{-\alpha t} \sin \omega t$ . Изобразить поведение этой точки на фазовой плоскости.

Выражение для скорости движения точки имеет вид

$$y = dx/dt = a(\omega e^{-\alpha t} \cos \omega t - \alpha e^{-\alpha t} \sin \omega t) = a e^{-\alpha t} \omega (\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t).$$

Осуществив путем исключения из рассмотрения времени переход к уравнению, связывающему координаты  $x$  и  $y$ , получаем

$$(y + \alpha x)^2 + \omega^2 x^2 = (a\omega)^2 e^{-\frac{2\alpha}{\omega} \arctg \frac{x}{y + \alpha x}}$$

Это уравнение спирали. При  $\alpha < 0$  спираль разворачивается (рис. 3.3), при  $\alpha > 0$  спираль сворачивается (рис. 3.4).

Приведенные примеры показывают, что по фазовым изображениям можно судить о характере движения. Преимущества фазового метода проявляются при исследовании систем, описываемых нелинейными дифференциальными уравнениями, т.е. когда решение в виде известных функций получено быть не может. Экспериментальное получение фазового пространства не встречает затруднений: достаточно подвести к горизонтальным пластинам осциллографа исследуемое напряжение, а к вертикальным – производную исследуемого напряжения.

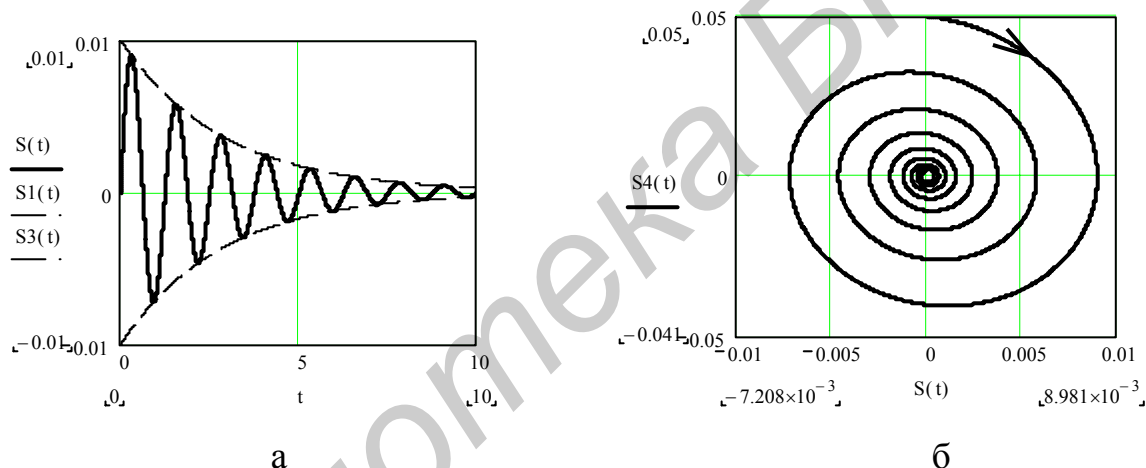


Рис. 3.3. Поведение материальной точки на фазовой плоскости при  $\alpha < 0$ : затухающий процесс (а) и его фазовый портрет (б)

Метод фазовой плоскости требует громоздких и кропотливых графических построений и потому в инженерной практике не применяется. Однако в тех случаях, когда нелинейное дифференциальное уравнение имеет очень сложный вид, метод фазового пространства оказывается наиболее рациональным.

Если анализируемая система характеризуется большим числом степеней свободы, тогда использование фазовой плоскости для описания ее поведения является недостаточным, так как в этом случае система описывается большим числом координат и отражается точкой в фазовом пространстве большего числа переменных.

Для  $n$ -мерного фазового пространства можно ввести аналогичные понятия особых точек, сепаратрис и предельных циклов.



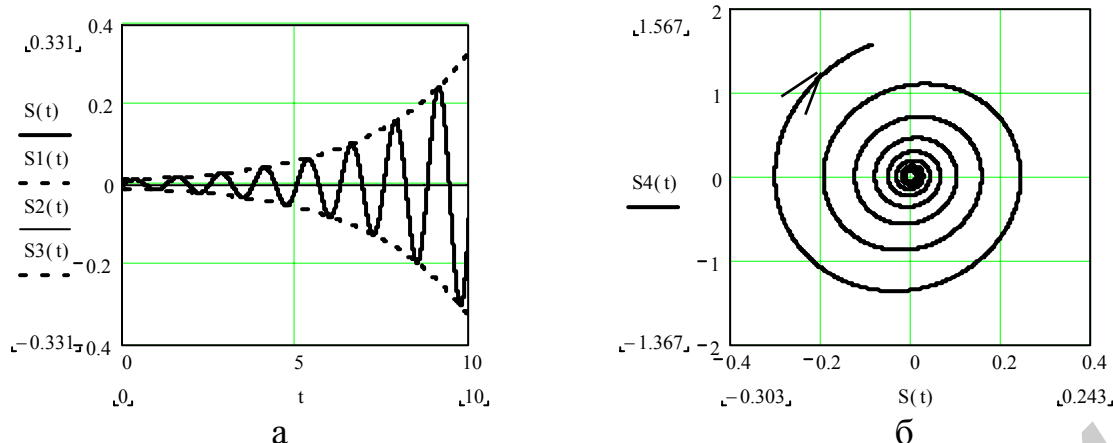


Рис. 3.4. Поведение материальной точки на фазовой плоскости при  $\alpha < 0$ : нарастающий процесс (а) и его фазовый портрет (б)

Можно также дать и новую классификацию особых точек, которая окажется значительно сложнее, чем для случая фазовой плоскости. Такая классификация для 3-мерного фазового пространства, приведена в книге Т.Хаяси «Нелинейные колебания в физических системах». – М: Мир, 1968.

Ввиду того что метод фазового пространства для систем с числом степеней свободы больше одной в значительной мере теряет свою наглядность и простоту, им обычно мало пользуются.

### 3.2. Анализ дифференциального уравнения автогенератора

Данный анализ проводится следующим образом. В достаточно малой окрестности произвольно выбранной точки  $x_0, y_0$  фазового пространства в общем случае нелинейное уравнение можно представить линейным:

$$\ddot{x} + F(x_0, y_0)\dot{x} + \Phi(x)x = 0. \quad (3.1)$$

Чем меньше размеры выбранной окрестности, тем точнее такая замена будет описывать поведение генератора. Начертив в этой области вид интегральных кривых, перейдем в окрестность соседней точки  $x'_0, y'_0$ , где коэффициенты уравнения уже будут иметь другие значения  $F(x'_0, y'_0)$  и  $\Phi(x', y')$  и т.д. В результате получится фазовый портрет генератора, как угодно мало отличающийся от истинного. Такой способ построения фазового портрета позволяет сделать ряд выводов.

Если функция  $F(x, y)$ , играющая роль коэффициента затухания в уравнении, сохраняет знак на всей фазовой плоскости, то движение по всем интегральным кривым при  $F(x, y) > 0$  будет декрементно, т.е. процесс возникновения автоколебаний будет сопровождаться рассеянием энергии. При  $F(x, y) < 0$  процесс является инкрементным и сопровождается поступлением энергии в колебательную систему. В первом случае состояние равновесия устойчиво и все интегральные кривые имеют вид затухающих траекторий. Во втором случае

состояние равновесия неустойчиво и амплитуда автоколебаний неограниченно возрастает. В обоих случаях среди интегральных кривых не будет ни одной, соответствующей замкнутым фазовым траекториям.

Если  $F(x, y) = 0$ , то кривая, соответствующая этому уравнению, разделит фазовую плоскость на декрементную и инкрементную области. В этом случае среди интегральных кривых появятся замкнутые траектории, располагающиеся частично в декрементной и инкрементной областях, либо на границе между этими областями. При этом соседние к ним траектории либо вливаются в них, либо сходят с них. Такие фазовые траектории называются предельными циклами.

### 3.2.1. Мягкий режим

При выполнении условия самовозбуждения амплитуда возрастает по экспоненциальному закону. Фазовая траектория, соответствующая этому случаю, имеет вид раскручивающейся спирали. С ростом амплитуды автоколебаний начинает проявляться нелинейность системы. Увеличение радиуса спирали замедляется и в пределе фазовая траектория превращается в окружность радиусом  $A_{ст.}$ , равным стационарной амплитуде колебаний. Если начальное положение изображающей точки задать вне окружности радиуса  $A_{ст.}$ , то движение будет проходить по скручивающейся спирали до перехода на окружность  $A_{ст.}$  В силу устойчивости стационарного режима автогенератора при любых начальных условиях изображающая точка переходит на окружность радиусом  $A_{ст.}$  Изолированная замкнутая кривая на фазовой плоскости, к которой с возрастанием времени  $t$  приближаются (по спирали) с внутренней или внешней стороны соседние фазовые траектории, называется предельным циклом (рис. 3.5).

Предельные циклы бывают трех видов:

- устойчивые, на которые траектории, проходящие через соседние по отношению к циклам точки, навиваются;
- неустойчивые, с которых эти траектории сходят;
- полуустойчивые, на которые с одной из сторон (снаружи или внутри замкнутого предельного цикла) траектории накручиваются, а с другой стороны – скручиваются.

Понятно, что в реальных условиях полуустойчивые циклы нереализуемы. Движение по устойчивому предельному циклу является периодическим и соответствует автоколебаниям системы. Таким образом, атрибутом автоколебательной системы является наличие в ее фазовом портрете хотя бы одного предельного цикла. На фазовом портрете автогенератора может быть несколько предельных циклов, вложенных друг в друга. При этом устойчивые и неустойчивые циклы чередуются. Внутренний цикл определяет тип особой точки. Если этот цикл устойчив, то особая точка (узел или фокус) лежит в инкрементной области и поэтому будет неустойчива. Такая система самовозбуждается, т.е. флуктуации выводят ее из состояния равновесия, и колебания нарастают до некоторого стационарного уровня, определяемого первым устойчивым циклом. Подобный режим возбуждения называется *мягким*. Нелинейные системы, у ко-

торых первый предельный цикл устойчивый, называются *автоколебательными системами с мягким самовозбуждением*.

Примером такой системы может служить транзисторный или ламповый генератор при выборе положения рабочей точки на линейном участке вольт-амперной характеристики. Он описывается уравнением Ван-дер-Поля:

$$\ddot{x} - \varepsilon(1-x^2)\dot{x} + x = 0. \quad (3.2)$$

Диссипативный член  $F(x, y) = -\varepsilon(1-x^2)$  при  $|x| < 1$  отрицателен, т.е. на фазовой плоскости область  $|x| < 1$  инкрементна.

Форма колебаний и вид предельного цикла определяется степенью нелинейности системы. В частности, для систем, описываемых уравнением типа

$$\ddot{x} + \varepsilon f(x, y)\dot{x} + x = 0, \quad (3.3)$$

к каковым относится и уравнение (2), нелинейность определяется величиной параметра  $\varepsilon$ . Для систем, близких к линейным, параметр  $\varepsilon \ll 1$  и колебания близки к гармоническим, а предельный цикл мало отличается от окружности. Особая точка представляет собой неустойчивый фокус. Для существенно нелинейных систем, когда  $\varepsilon \gg 1$ , предельный цикл заметно отличается от окружности, колебания принимают несинусоидальную форму и при очень большой нелинейности становятся релаксационными. Особая точка в этом случае представляет собой неустойчивый узел. Параметр  $\varepsilon$  определяет также скорость установления стационарных автоколебаний, т.е. длительность переходного процесса. С ростом  $\varepsilon$  время установления стационарных колебаний сокращается.

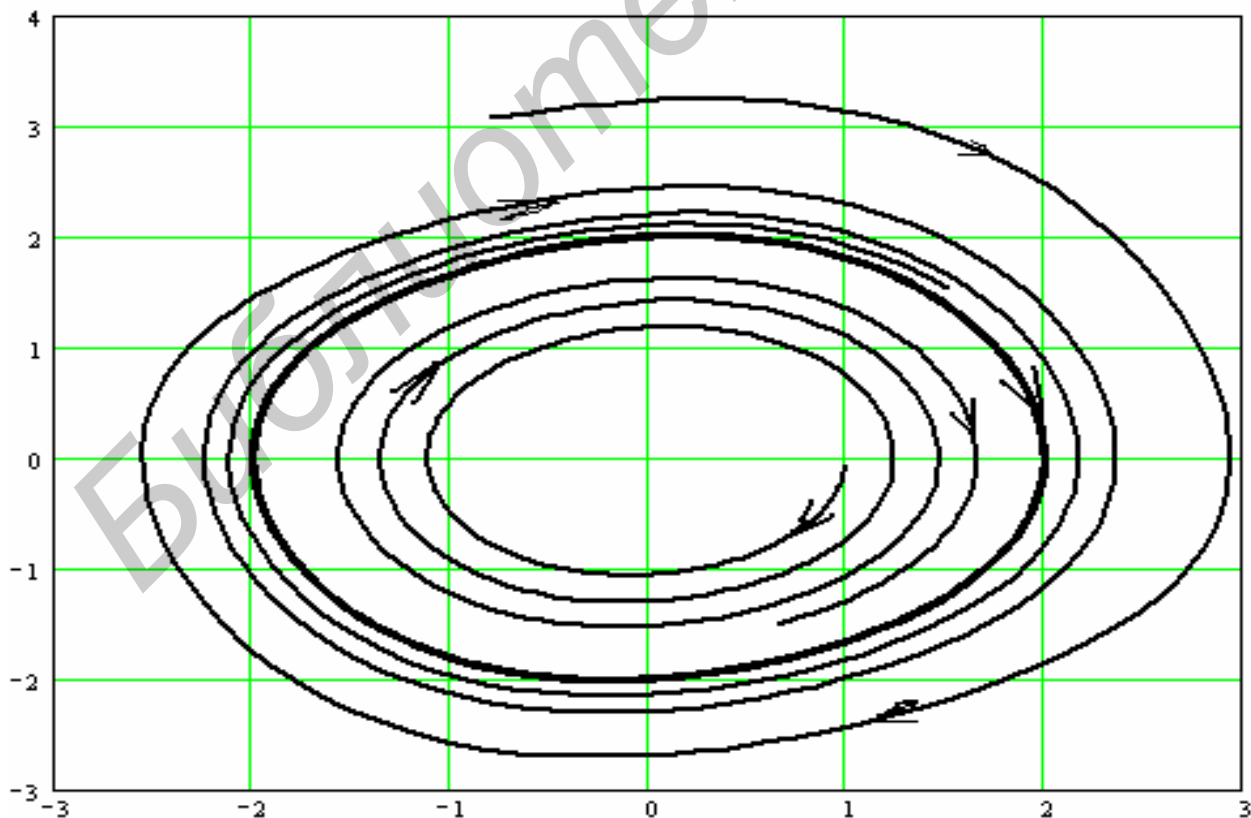


Рис. 3.5. Фазовый портрет автоколебаний в мягком режиме

### 3.2.2. Жесткий режим

Случай жесткого режима отличается от мягкого тем, что при малых амплитудах затухание положительно и фазовые траектории сворачиваются к началу координат. Когда амплитуда автоколебаний достигает значения  $U_A$  (рис. 3.6), затухание обращается в нуль. Этому значению амплитуды соответствует свой предельный цикл, которому соответствует амплитуда стационарных колебаний  $U_A$ . Однако этот цикл неустойчив, так как фазовые траектории не наворачиваются на него. Фазовые траектории, сходя с этого неустойчивого предельного цикла, либо свертываются во внутрь к началу координат, либо развертываются в области вне неустойчивого цикла, стремясь к устойчивому предельному циклу, соответствующему стационарной амплитуде  $U_B$ .

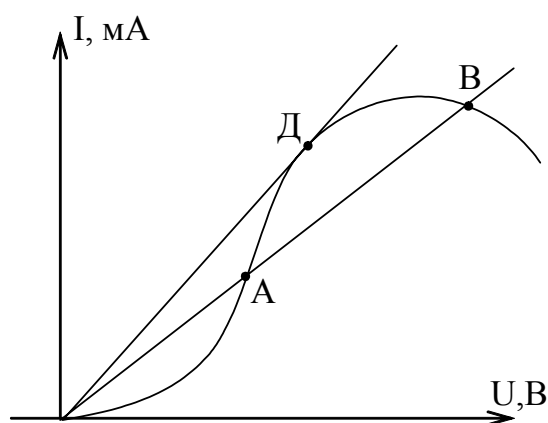


Рис. 3.6. Колебательная характеристика для жесткого режима

При дальнейшем росте амплитуды автоколебаний, превышающей величину, соответствующую амплитуде колебаний в точке А, в области вне неустойчивого цикла затухание снова становится отрицательным, и амплитуда автоколебаний растет, пока затухание снова не обратится в нуль. Здесь образуется второй предельный цикл, на этот раз уже устойчивый. Отличие устойчивого предельного цикла от неустойчивого с точки зрения фазовых диаграмм состоит в том, что фазовые траектории стремятся к устойчивому циклу и сбегают с неустойчивого.

Таким образом, фазовую плоскость можно разбить на три части:

- 1 – внутри неустойчивого цикла,
- 2 – между устойчивым и неустойчивым циклами,
- 3 – вне устойчивого цикла.

Автоколебания не возбуждятся, если начальные условия изображаются точкой в области 1, и возбудятся, если изображающая точка лежит в области 2 или 3.

Амплитуда стационарных колебаний, соответствующая положению рабочей точки на колебательной характеристике, в точке Д соответствует неустойчивому режиму, когда устойчивый и неустойчивый циклы совпадают. По этой причине иногда точку Д называют *односторонне устойчивой* или *односторонне неустойчивой*.

Если внутренний цикл автоколебательной системы неустойчивый, то самовозбуждение системы невозможно, так как состояние равновесия лежит в декрементной области и является устойчивым. Для того чтобы вывести систему в режим автоколебаний, т.е. на устойчивый цикл, изображающую точку нужно

забросить на одну из траекторий, вливающих в устойчивый цикл, т.е. вывести ее за пределы неустойчивого цикла. Физически для этого системе надо задать необходимое отклонение от положения равновесия или сообщить начальный толчок. Такой способ возбуждения называется *жестким* и соответствующая колебательная система называется *системой с жестким возбуждением*. Примером такой системы может служить транзисторный или ламповый генератор при выборе рабочей точки на нижнем сгибе проходной характеристики транзистора.

Работа такого генератора описывается уравнением типа

$$\ddot{x} + \varepsilon(1 - \delta_1 x^2 + \delta_2 x^4)\dot{x} + x = 0 \quad (3.4)$$

при  $\delta_1 > 0$  и  $\delta_2 > 0$ .

Наличие неустойчивого и устойчивого циклов объясняется характерным для жесткой системы поведением коэффициента при первой производной. Фазовый портрет жесткой системы показан на рис. 3.7, из которого можно увидеть характер процессов установления в зависимости от начальных условий.

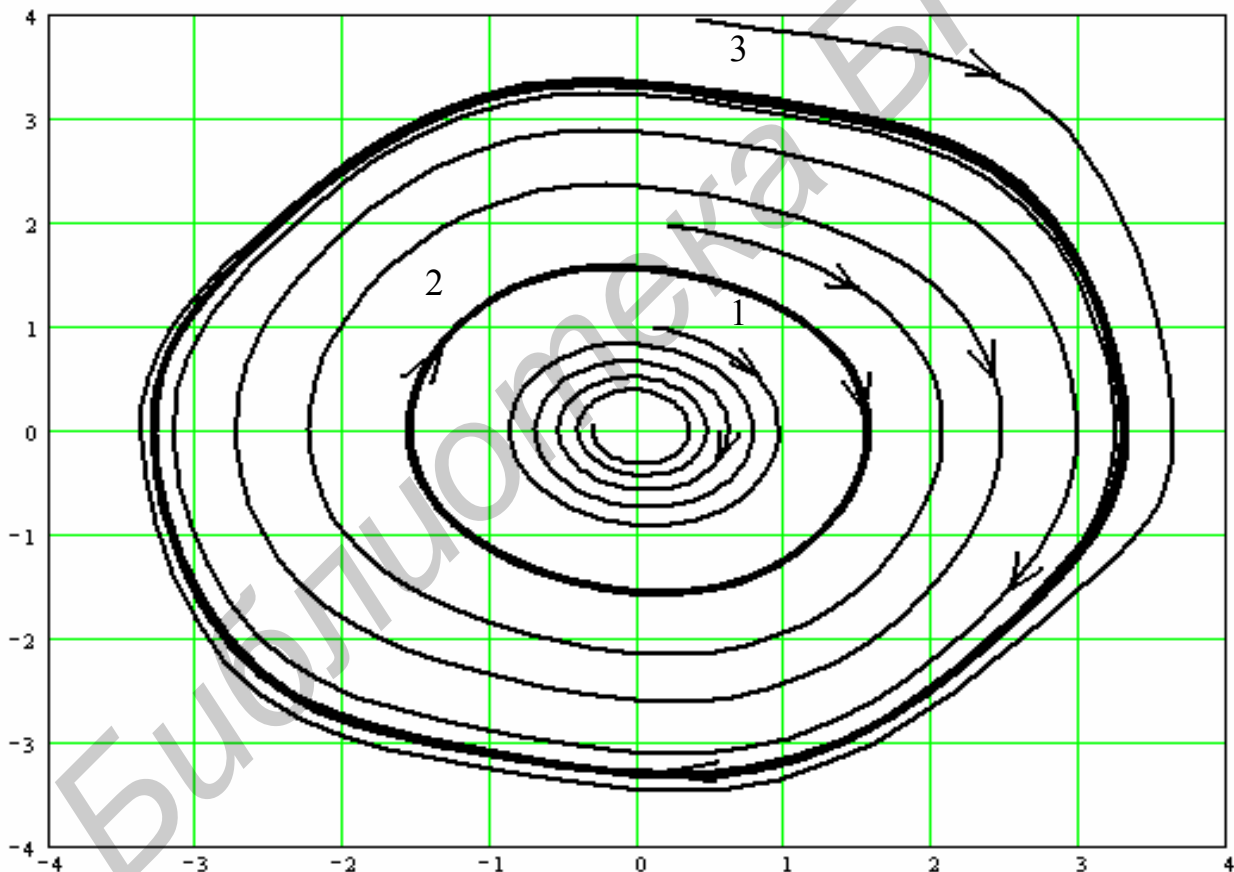


Рис. 3.7. Предельные циклы фазового портрета генератора в жестком режиме

### 3.3. Анализ фазовых портретов автогенератора в системе MathCAD

Широкое использование методов компьютерной математики для решения научных и инженерных задач стимулируется не только возможностью наглядной интерпретации результатов исследования на фазовой плоскости, но и хорошо разработанными компьютерными средствами решения дифференциальных уравнений с помощью пакетов, представляющих собой системы математических вычислений, позволяющих выполнять численный анализ и символьные преобразования и выводить результаты в виде двумерных или трехмерных графиков.

Цель данной работы – получение и анализ фазовых портретов автогенератора, работающего в мягком и жестком режиме, путем использования пакета компьютерной математики MathCAD.

Автогенератор является сугубо нелинейным устройством, поэтому широкий класс явлений, протекающих в нем, можно описать нелинейным уравнением второго порядка

$$\ddot{x} + F(x, \dot{x})\dot{x} + \Phi(x)x = 0, \quad (3.5)$$

которое можно заменить системой двух уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y, \\ \frac{dy}{dt} = -F(x, \dot{x})y - \Phi(x)x, \end{cases} \quad (3.6)$$

позволяющей легко получить уравнение интегральных кривых

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{F(x, \dot{x}) + \Phi(x)}{y}. \quad (3.7)$$

Поскольку это уравнение в общем случае не поддается интегрированию, для построения фазового портрета автогенератора и его наглядной интерпретации используем встроенную функцию *rkfixed* пакета MathCAD.

### 3.4. Встроенная функция rkfixed пакета Mathcad

Встроенная функция пакета Mathcad *rkfixed*(y, X1, X2, npoint, D) возвращает матрицу, в которой первый столбец содержит точки, в которых оценивается решение уравнения. Другие столбцы соответствуют значениям первых  $n - 1$  производных. Функция *rkfixed* использует метод Рунге-Кутты четвертого порядка для решения системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка.

Аргументы функции *rkfixed*:

$y$  – это вектор начальных значений размерностью  $n$  ( $n$  – порядок дифференциального уравнения или число уравнений в системе дифференциальных уравнений первого порядка);

$X_1, X_2$  – конечные точки интервала, на котором оценивается решение дифференциального уравнения. Начальные значения  $x$  и  $y$  соответствуют значениям  $X_1$ ;

`npoint` – число точек (не считая начальной), в которых ищется приближенное решение. При помощи этого аргумента определяется число строк  $(1 + npoint)$  матрицы, возвращаемой функцией `rkfixed`.

$D(x,y)$  – функция, возвращающая значение в виде вектора из  $n$  элементов, содержащих первые производные от неизвестных функций.

### 3.5. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Исследовать фазовый портрет линейного осциллятора, соответствующий особой точке типа «центр». Исследуемое уравнение имеет вид  $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ . Положить  $\omega_0 = 100\pi$ . Для построения фазового портрета выбрать начальные условия в виде задания 6 – 8 точек. С помощью функции `rkfixed` пакета `Mathcad` получить решения дифференциального уравнения для выбранных начальных условий. Изобразить фазовый портрет линейного осциллятора, построив графики фазовых траекторий, соответствующие выбранным начальным условиям. Объяснить полученные результаты.

2. Исследовать фазовый портрет линейного осциллятора, соответствующий особой точке типа «устойчивый фокус». Исследуемое уравнение в этом случае имеет вид  $\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$ . Положить  $\alpha = 20\pi, \omega_0 = 100\pi$ . Выбрать начальные условия в виде 6 – 8 точек. По аналогии с действиями, указанными в п.1 настоящих методических указаний, получить решения уравнения линейного осциллятора для выбранных начальных условий. Построить графики фазовых траекторий, соответствующих выбранным начальным условиям. Объяснить полученные результаты.

3. Исследовать фазовые портреты линейного осциллятора, соответствующие особой точке типа «неустойчивый фокус», положив  $\alpha = 15\pi, \omega_0 = 100\pi$ . По аналогии с действиями предыдущего пункта получить решения, соответствующие этому режиму для различных начальных условий. Построить графики фазовых траекторий для всех начальных условий. Объяснить полученные результаты.

4. Исследовать фазовые портреты линейного осциллятора, соответствующие особой точке типа «устойчивый узел». Положить  $\alpha = 110\pi, \omega_0 = 100\pi$ . Задать 6 – 8 точек начальных условий. Получить решения дифференциального уравнения и построить графики траекторий, соответствующих этим начальным условиям. Объяснить полученные результаты.

5. Исследовать фазовые портреты линейного осциллятора, соответствующие особой точке типа «неустойчивый узел». Положить  $\alpha = -110\pi, \omega_0 = 100\pi$ . Задать 6 – 8 точек начальных условий. Получить решения дифференциального уравнения и построить графики траекторий, соответствующие этим начальным условиям. Объяснить полученные результаты.

6. Исследовать фазовый портрет линейной системы второго порядка, соответствующий особой точке типа «седло». Уравнение осциллятора в этом случае имеет вид  $\ddot{x} - \omega_0^2 x = 0$ . Положить  $\omega_0 = 100\pi$ . Задать 6 – 8 точек начальных условий. Получить решения дифференциального уравнения и построить графики траекторий, соответствующих этим начальным условиям. Объяснить полученные результаты.

7. Исследовать фазовый портрет линейной системы второго порядка, соответствующий особой точке типа «седло, наклоненное вправо». Уравнение осциллятора в этом случае имеет вид  $\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} - \omega_0^2 x = 0$ . Положить  $\alpha = 200\pi$ ,  $\omega_0 = 100\pi$ . Задать 6 – 8 точек начальных условий. Получить решения дифференциального уравнения и построить графики траекторий, соответствующих этим начальным условиям. Объяснить полученные результаты.

8. Исследовать фазовый портрет линейной системы второго порядка, соответствующий особой точке типа «седло». Уравнение осциллятора в этом случае имеет вид  $\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} - \omega_0^2 x = 0$ . Положить  $\alpha = -200\pi$ ,  $\omega_0 = 100\pi$ . Задать 6 – 8 точек начальных условий. Получить решения дифференциального уравнения и построить графики траекторий, соответствующих этим начальным условиям. Объяснить полученные результаты.

9. Выполнить действия, которые предусмотрены предыдущими пунктами настоящей лабораторной работы для нелинейной системы второго порядка для различных уровней нелинейности и сравнить результаты проведенных измерений с полученными результатами исследования линейной системы второго порядка.

10. Исследовать режим синхронизации нелинейного осциллятора.



## ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

С помощью осциллографа можно приближенно измерять фазовый сдвиг между двумя гармоническими сигналами. Для этого используется метод линейной развертки и метод эллипса.

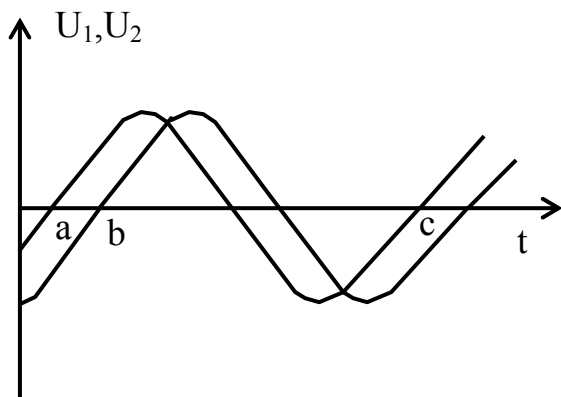


Рис. П.1. Измерение фазового сдвига с помощью осциллографа методом линейной развертки

**Метод линейной развертки.** Для проведения фазовых измерений этим методом необходим двухлучевой осциллограф. Подавая сигналы  $U_1$  и  $U_2$ , сдвиг фаз между которыми необходимо измерить, на входы  $Y_1$  и  $Y_2$ , выбирают частоту развертки такой, чтобы обеспечить удобное измерение по шкале экрана осциллографа отрезков  $ab$  и  $ac$  (рис. П.1). При этом обычно амплитуды сигналов подбираются одинаковыми. Тогда фазовый сдвиг  $\varphi$ , измеренный в градусах, определяется с помощью простого соотношения

$$\varphi(\text{град.}) = (ab/ac) \cdot 360^\circ.$$

Смысл измерения сводится к следующему. Период колебания, соответствующий набегу фазы в  $360^\circ$ , отображается длиной отрезка  $ac$ , а разность фаз колебаний отражается длиной отрезка  $ab$ , естественно, при хорошей линейности развертки осциллографа.

Следует отметить, что величину отрезка  $ab$  необходимо измерять между точками пересечения возрастающих участков гармонического сигнала с горизонтальной осью, но ни в коем случае не между точкой пересечения горизонтальной оси с нарастающим участком одной синусоиды и убывающим участком другой.

**Метод эллипса.** Существует несколько разновидностей этого метода. Остановимся кратко на некоторых из них.

1. При подаче на входы  $X$  и  $Y$  (при отключенной развертке) двух напряжений  $U_X$  и  $U_Y$ , сдвинутых друг относительно друга на некоторый угол  $\varphi$ , на экране осциллографа появляется фигура Лиссажу в виде определенным образом ориентированного эллипса. Если центр эллипса совмещен с началом системы координат экрана, то фазовый сдвиг  $\varphi$  можно определить по формуле

$$\varphi = \arcsin(A/B),$$

где  $A$  и  $B$  показаны на рис. П.2. Для удобства определения их длин коэффициенты усиления усилителей  $X$  и  $Y$  подбирают таким образом, чтобы эллипс вписывался в квадрат.

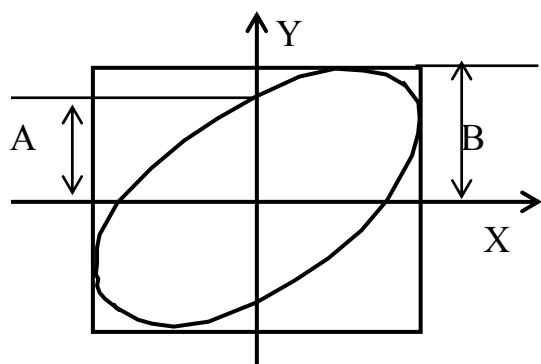


Рис. П.2. Измерение и расчет фазового сдвига по формуле  $\varphi = \arcsin(A/B)$

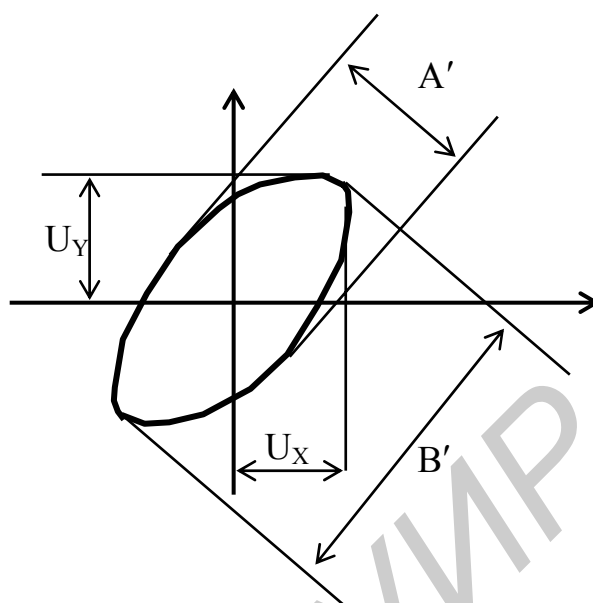


Рис. П.3. Измерение и расчет фазового сдвига по формуле  $\varphi = 2 \arctg \frac{A'}{B'}$

2. Если  $U_X = U_Y$ , то тогда (рис. П.3)

$$\operatorname{tg}(\varphi/2) = A'/B',$$

где отрезок  $A'$  равен малой оси эллипса, а отрезок  $B'$  – его большой оси. Отсюда получаем

$$\varphi = 2 \arctg(A'/B').$$

3. Если  $U_X$  и  $U_Y$  произвольны, то из этого рисунка следует, что

$$\varphi = \arcsin(A'B'/U_X U_Y).$$

Следует отметить, что все три рассмотренные выше разновидности метода эллипса позволяют лишь приблизительно (с погрешностью 5...10 %) оценить величину фазового сдвига без определения его знака. На рис. П.4 показан вид фигур Лиссажу для некоторых частных случаев, когда напряжения  $U_X$  и  $U_Y$  равны. Основными причинами значительной погрешности метода являются неточность в определении длин отрезков, деформация эллипса из-за негармоничности исследуемых напряжений, неидентичность фазочастотных характеристик каналов X и Y осциллографа.

### ***Практические рекомендации по измерению сдвига фаз между входным и выходным сигналами RC-цепи RC-генератора***

Приведем практические рекомендации по измерению разности фаз между входным и выходным напряжением фазосдвигающей цепи RC-генератора. Эта разность фаз на частоте генерирования колебаний RC-генератором должна равняться  $180^\circ$ . Поэтому для измерения разности фаз входное колебание нужно подать на вход X осциллографа, так как его амплитуда имеет большее значение, чем амплитуда напряжения на выходе фазосдвигающей RC-цепи. На вход Y осциллографа следует подать напряжение с выхода фазосдвигающей цепи.

Нужно обязательно выключить внутреннюю синхронизацию осциллографа, т.е. использовать осциллограф как электронно-лучевую трубку, на которую работают два усилителя с сигналами, поступающими на входы X и Y осциллографа.

Изменяя частоту подаваемого на вход X сигнала, можно наблюдать изображение фигуры Лиссажу на экране осциллографа, предварительно выбрав подходящий размер ее по горизонтали. Как следует из рис. П.4, сдвиг по фазе между сигналами, действующими на входах X и Y осциллографа, составит  $180^\circ$  тогда, когда наблюдаемая фигура выродится в прямую линию, наклоненную под углом, примерно равным  $135^\circ$ , к горизонтальной оси.

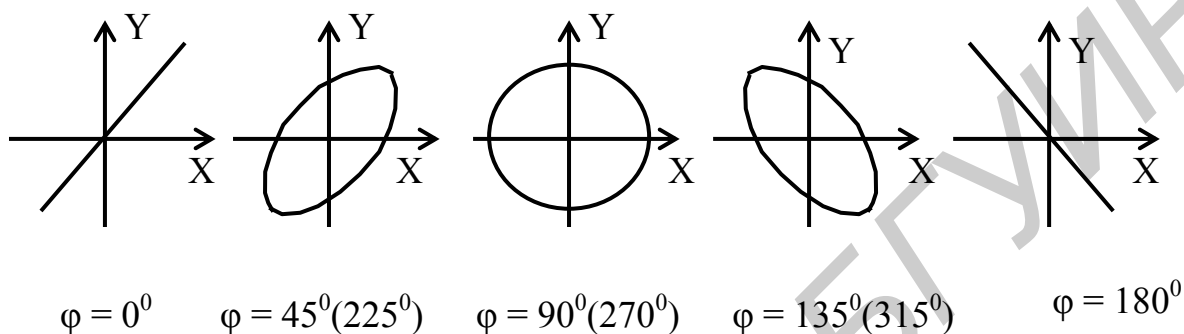


Рис. П.4. Фигуры Лиссажу для некоторых частных случаев, когда амплитуды напряжений  $U_X$  и  $U_Y$  равны

Теперь остается прочесть на шкале генератора значение частоты, на которой наблюдается фазовый сдвиг, равный  $180^\circ$ , т.е. получить значение генерируемой RC-автогенератором частоты, в схеме которого используется анализируемая RC-цепь.

Наиболее удобно работать с фигурой Лиссажу, когда она вписывается в квадрат возможно больших размеров, который наблюдается на экране осциллографа.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ.....	5
1. LC-автогенераторы гармонических колебаний.....	5
1.1. Понятие автоколебательной системы.....	5
1.2. Физическая сущность возникновения колебаний в схеме LC-автогенератора.....	6
1.3. Различные уровни изучения процессов в генераторе.....	7
1.4. Квазилинейная теория автогенератора.....	11
1.5. Обобщенная схема автогенератора в квазилинейной теории.....	12
1.6. Основные схемы LC-генераторов и их эквивалентные схемы.....	14
1.7. Трехточечные схемы автогенераторов.....	18
1.8. Кварцевые генераторы.....	19
1.9. LC-генераторы на приборах с отрицательным сопротивлением.....	21
1.10. Мягкий и жесткий режимы в автогенераторе.....	28
1.11. Схема автогенератора с автоматическим смещением.....	28
1.12. Графическое определение стационарной амплитуды генерируемых колебаний. Устойчивость стационарной амплитуды.....	30
1.12.1. Метод средней крутизны.....	30
1.12.2. Метод колебательных характеристик.....	34
1.13. Зависимость тока в контуре от связи при различных режимах.....	35
1.14. Стабильность частоты генерируемых колебаний.....	36
1.15. Описание схемы принципиальной электрической лабораторного макета.....	37
1.16. Порядок выполнения лабораторной работы.....	39
1.17. Вопросы для самопроверки.....	41
2. RC-ГЕНЕРАТОРЫ.....	43
2.1. Однокаскадная схема RC-генератора.....	43
2.2. Двухкаскадная схема RC-генератора.....	46
2.3. RC-генератор гармонических колебаний на операционном усилителе.....	49
2.4. Необходимость введения автоматической регулировки усиления в RC-генераторах.....	49
2.5. Описание схемы принципиальной электрической лабораторного макета RC-генератора.....	51
2.6. Порядок выполнения работы.....	51
2.7. Вопросы для самопроверки.....	53
3. ИЗОБРАЖЕНИЕ ПРОЦЕССОВ В АВТОГЕНЕРАТОРЕ НА ФАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ.....	54
3.1. Понятие фазового пространства.....	54
3.2. Анализ дифференциального уравнения автогенератора.....	57
3.2.1. Мягкий режим.....	58
3.2.2. Жесткий режим.....	59

3.3. Анализ фазовых портретов автогенератора в системе MathCAD.....	62
3.4. Встроенная функция gkfixed пакета MathCAD .....	62
3.5. Порядок выполнения лабораторной работы .....	63
<i>Приложение. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА С ПОМОЩЬЮ</i> <i>ОСЦИЛЛОГРАФА .....</i>	<i>65</i>

Св. план 2005, поз. 87

Учебное издание

**Першин Виктор Тихонович**

## **ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальностей  
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ,  
МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ,  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СРЕДСТВ, ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА, МАРКЕТИНГ  
всех форм обучения

Редактор Т.П. Андрейченко  
Корректор Е.Н. Батурчик

---

Подписано в печать 7.06.2006.  
Гарнитура «Таймс».  
Уч.-изд. л. 4,0.

Формат 60x84 1/16.  
Печать ризографическая.  
Тираж 150 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 4,19.  
Заказ 242.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.  
220013, Минск, П. Бровка, 6