

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
"Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники"

Кафедра радиотехнических систем

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

Методические указания
к лабораторной работе
по курсу «Радиопередающие устройства»
для студентов специальностей «Радиотехника»,
«Радиоэлектронные системы»,
«Проектирование и производство радиоэлектронных средств»
всех форм обучения

Минск 2004

УДК 621.396.61 (075.8)
ББК 32.848-04 я 73
И 88

С о с т а в и т е л и:
В.В. Ползунов, Н.А. Титович

И 88 **Исследование** транзисторного автогенератора: Метод. указания к лаб. работе по курсу «Радиопередающие устройства» для студ. спец. «Радиотехника», «Радиоэлектронные системы», «Проектирование и производство радиоэлектронных средств» всех форм обучения /Сост. В.В. Ползунов, Н.А. Титович. – Мн.: БГУИР, 2004. - с: ил.
ISBN 985-444-684-0

В методических указаниях рассматриваются принципы генерирования, условия и режимы возбуждения колебаний, стационарное состояние и эквивалентные схемы, а также энергетические и нагрузочные характеристики автогенераторов.

УДК 621.396.61 (075.8)
ББК 32.848-04 я 73

ISBN 985-444-684-0

© Ползунов В.В., Титович Н.А.,
составление, 2004
© БГУИР, 2004

Содержание

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ
2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ
 - 2.1. Общие сведения об автоколебаниях
 - 2.2. Дифференциальное уравнение автогенератора.
Условия самовозбуждения
 - 2.3. Стационарный режим автогенератора
 - 2.4. Режимы возбуждения колебаний в автогенераторе
 - 2.5. Эквивалентные схемы автогенераторов
 - 2.6. Выбор режима работы автогенератора.
3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ
 - 4.1. Подготовка макета к работе
 - 4.2. Исследование автогенератора, построенного по емкостной трехточечной схеме
 - 4.3. Исследование автогенератора, построенного по индуктивной трехточечной схеме
 - 4.4. Исследование влияния E_k на частоту генерации
5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА
6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ
- ЛИТЕРАТУРА

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с физическими процессами и принципами построения автогенераторов. Исследовать энергетические характеристики и влияние нагрузки на режим работы транзисторных автогенераторов, построенных по емкостной и индуктивной трехточечным схемам, в критическом и недонапряженном режимах.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Общие сведения об автоколебаниях

Колебания, самостоятельно возникающие в отсутствие внешних воздействий, называются автоколебаниями, а устройства и системы, в которых они возникают, - автоколебательными. Такими устройствами, широко используемыми в современной технике, являются разнообразные источники или генераторы колебаний (электрических, механических, звуковых, световых), называемые автогенераторами (АГ).

В состав автоколебательной системы должен входить источник энергии, за счет расхода которой поддерживаются колебания. В большинстве случаев в автогенераторах используются источники энергии постоянного напряжения или тока. Такие автогенераторы являются преобразователями энергии постоянного напряжения или тока в энергию колебаний.

Приведем принципиальные схемы автогенераторов на биполярном (а) и полевом (б) транзисторах с колебательным контуром в выходной цепи (рис. 1).

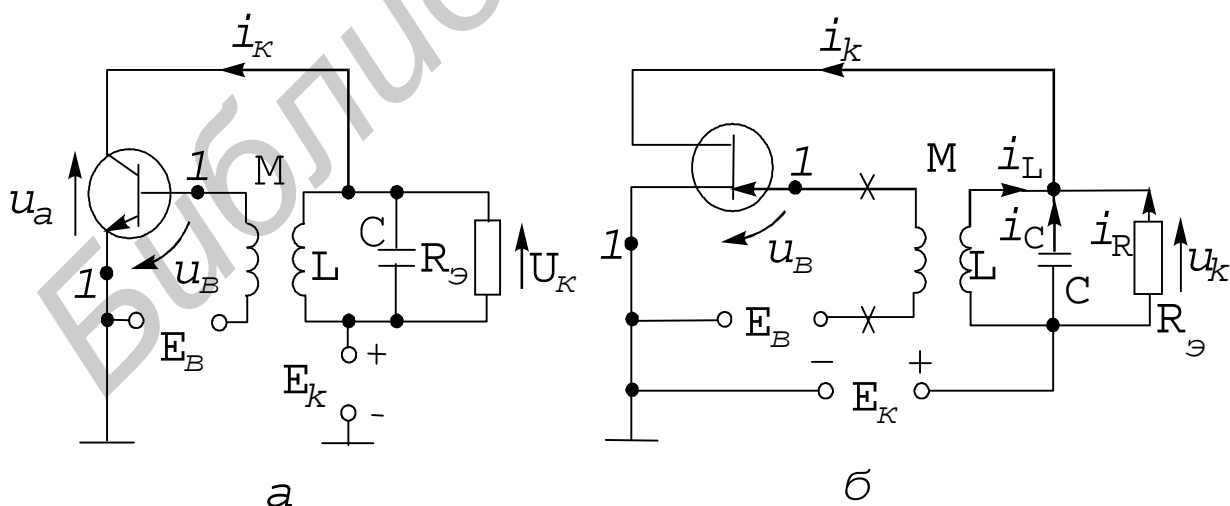


Рис.1

Каждая схема состоит из двух частей: 1) избирательного усилителя, содержащего активный нелинейный элемент (транзистор), входом которого яв-

ляется промежуток между точками 1 - 1, и колебательную систему (колебательный контур), 2) цепи обратной связи (трансформатора), по которой колебание с выхода усилителя подается обратно на его вход. Генераторы, содержащие избирательный усилитель и внешнюю цепь обратной связи, называются автогенераторами с внешней обратной связью. Приведем структурную схему автогенератора с внешней обратной связью, содержащую упомянутые выше части (рис.2).

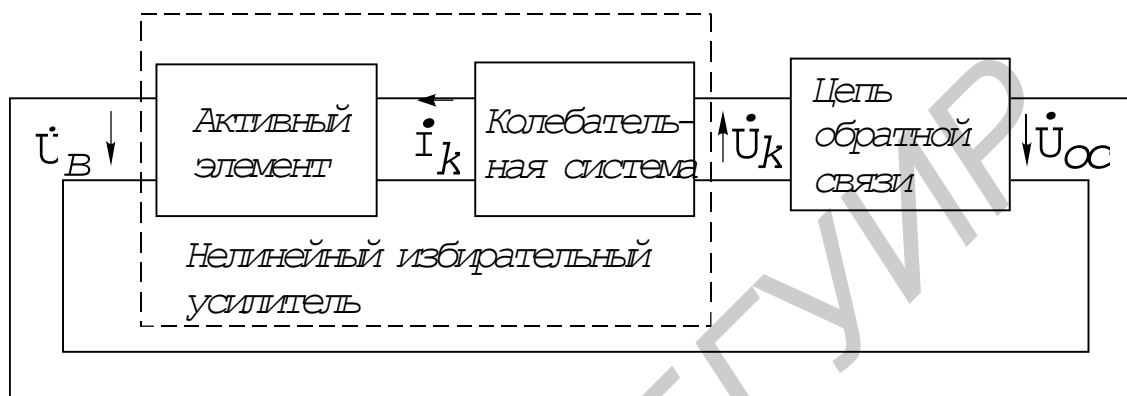


Рис.2

Здесь и далее будем использовать следующие обозначения токов и напряжений независимо от типа применяемого активного элемента (АЭ): u_B - напряжение на входе АЭ; u_a - напряжение на выходе АЭ; u_K - напряжение на контуре; i_B - входной ток АЭ; i_K - ток в выходной цепи АЭ.

В большинстве случаев причиной возникновения автоколебаний в генераторах являются флуктуации, всегда имеющие место в элементах реальной схемы. Ток, протекающий через активный элемент, всегда флуктуирует из-за наличия дробового эффекта. Другими источниками подобных, обычно весьма слабых колебаний, являются тепловое движение электронов в приборе и резисторах, флуктуации токораспределения в приборах и т. д. Благодаря этим явлениям токи и напряжения во всех элементах схемы даже при постоянстве питающих напряжений быстро изменяются случайным образом. Спектр этих колебаний близок по характеру к белому шуму, т.е. содержит компоненты практически любых частот. Предположим, что такие флуктуации появились в напряжении u_B на входе активного элемента АЭ. Они вызовут колебания тока i_K в выходной цепи АЭ. На выходе колебательной системы (контуре) появится напряжение u_K , причем, поскольку контур имеет максимальное эквивалентное сопротивление $Z_{\Omega} = R_{\Omega}$ на резонансной частоте ω_0 , наибольшее напряжение на нем создадут компоненты с частотами, близкими к ω_0 . Напряжение u_K через цепь обратной связи передается на вход АЭ, создавая напряжение u'_B . Если какая-то компонента u'_B окажется в фазе с первоначальной компонентой u_B той же частоты и притом будет иметь большую амплитуду, она вызовет большее

изменение тока i_K , что приведет к дальнейшему возрастанию напряжения u_K и, как следствие, еще большему u_B . Таков механизм самовозбуждения колебаний частоты ω_r , близкой к ω_0 , в процессе которого амплитуды колебаний u_B , i_K и u_K возрастают. Этот процесс имеет место, если на частоте ω_r коэффициент передачи напряжения по замкнутой цепи генератора больше единицы: $K > 1$. Представляя последний в виде произведения коэффициента усиления усилителя $K_y = U_K/U_B$ и коэффициента обратной связи $K_{o.c} = U_{o.c} / U_K$, получим условие, необходимое для нарастания колебаний:

$$K = K_y K_{o.c} > 1. \quad (1)$$

2.2. Дифференциальное уравнение автогенератора. Условия самовозбуждения

Составим дифференциальное уравнение генератора (см. рис.1), учитывая только переменные составляющие токов и напряжений. Согласно первому закону Кирхгофа, ток в выходной цепи

$$i_K = i_L + i_C + i_R. \quad (2)$$

С целью упрощения расчетов используем два допущения:

а) входной ток активного элемента считаем отсутствующим ($i_B = 0$), что достигается в генераторах на полевых транзисторах подачей надлежащего смещения во входную цепь, тогда

$$u_K = L \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{C} \int i_C dt = i_R R_3, \quad (3)$$

$$u_B = M \frac{di_L}{dt} = \frac{M}{L} u_K; \quad (4)$$

б) пренебрегаем влиянием выходного напряжения усилителя на ток i_K , считая его зависящим только от входного напряжения

$$i_K = \Phi(u_B), \quad (5)$$

что в большинстве случаев лишь несколько снижает точность расчетов, не влияя на характер получающихся зависимостей.

Выражение (5) можно рассматривать как аппроксимацию проходной характеристики активного элемента относительно рабочей точки. Производную тока i_K по времени запишем как

$$\frac{di_K}{dt} = \frac{di_K}{du_B} \frac{du_B}{dt} = S(u_B) \frac{du_B}{dt}, \quad (6)$$

где $S(u_B) = \Phi'(u_B)$ - крутизна характеристики (5). Заменяем токи в (2), согласно (5) и (3):

$$\frac{1}{L} \int u_K dt + C \frac{du_K}{dt} + \frac{u_K}{R_3} = \Phi(u_B).$$

Дифференцируя это уравнение по времени, используя (6) и (4) и обозначая $\omega_0^2 = 1/LC$, получаем дифференциальное уравнение генератора:

$$\frac{d^2 u_B}{dt^2} + \left[\frac{1}{R_3 C} - \frac{MS(u_B)}{LC} \right] \frac{du_B}{dt} + \omega_0^2 u_B = 0. \quad (7)$$

Это уравнение является нелинейным, поскольку коэффициент при du_B/dt зависит от искомой переменной u_B . Нелинейность уравнения является следствием наличия в схеме нелинейного элемента. Уравнение определяет все свойства рассматриваемого генератора, его решение позволяет установить и условия самовозбуждения, и особенности стационарных колебаний, и характер переходных процессов.

При определении условий самовозбуждения колебаний нелинейное уравнение генератора (7), как уже отмечалось, может быть заменено линейным. Действительно, в этом случае нас только интересует, что будет с небольшим отклонением от состояния равновесия: станет оно затухать или нарастать. Так как нелинейная функция $S(u_B)$, представляющая собой крутизну проходной характеристики прямой передачи, не имеет разрыва, для малых величин u_B она может быть заменена значением этой функции при $u_B=0$, т.е. крутизной $S(0)=S$ в рабочей точке. В результате нелинейное уравнение (7) превращается в линейное:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \left[\frac{1}{R_3 C} - \frac{MS}{LC} \right] \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0. \quad (8)$$

Здесь напряжение u записано без индекса, поскольку уравнение справедливо и для u_K , в чем легко убедиться, используя (4). Уравнение (8) можно записать как уравнение контура

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + 2\alpha_3 \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0, \quad (9)$$

где $\alpha_3 = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{R_3 C} - \frac{MS}{LC} \right]$ - эквивалентный коэффициент затухания.

Его решение имеет вид

$$u = A e^{-\alpha_3 t} \sin(\omega_C t + \varphi),$$

где A и φ - амплитуда и фаза, зависящие от начальных условий; $\omega_C = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha_3^2}$ - частота свободных колебаний. Если записать $R_3 = L/Cr$, где r - сумма сопротивлений потерь, включенных последовательно в ветвях контура, то

$$\alpha_3 = \frac{1}{2} \left[\frac{r}{L} - \frac{MS}{LC} \right] = \alpha - \frac{MS}{2LC}, \quad (10)$$

где $\alpha = r/2L = 1/2R_3C$ — коэффициент затухания контура.

Уравнение (9) показывает, что генератор эквивалентен колебательному контуру, коэффициент затухания которого уменьшен на величину $MS/2LC$, зависящую от взаимной индукции M , т.е. от обратной связи. Полученный результат означает, что переменное напряжение на входе активного элемента, благодаря наличию обратной связи, создает ток i_k , доставляющий в колебательную систему энергию, компенсирующую потери в ней. Необходимая же энергия переменного тока i_k получается благодаря тому, что переменное напряжение u_B управляет расходом энергии источника постоянного тока, имеющимся в выходной цепи, т.е. благодаря преобразованию энергии постоянного тока в энергию переменного тока.

Если обратная связь невелика ($\alpha_3 > 0$ или $MS/C < r$), вносимая энергия лишь частично компенсирует расходуемую в колебательной системе, поэтому возникшее колебание затухает, хотя и медленнее, чем в отсутствие обратной связи. При достаточно сильной обратной связи коэффициент α_3 оказывается отрицательным (вносимая энергия больше расходуемой) и колебания нарастают. Рассмотрим зависимость характера колебаний от α_3 (рис. 3).

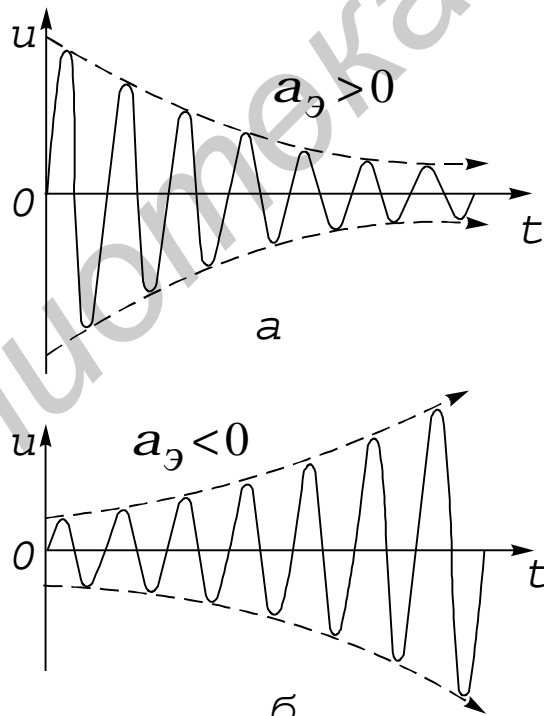


Рис.3

Условия самовозбуждения генератора можно записать как

$$\alpha_3 < 0 \quad (11)$$

или

$$M > M_{кр} = L/SR_3 = rC/S. \quad (12)$$

В рамках допущений, принятых при выводе уравнения генератора, коэффициент обратной связи $K_{o.c} = M/L$, а коэффициент усиления усилителя $K_y = SR_3$. Поэтому условие самовозбуждения (12) идентично условию (1).

Обратная связь, способствующая самовозбуждению колебаний, называется положительной. В рассмотренном случае она соответствует $M > 0$. Если знак M изменить на обратный, для чего достаточно поменять местами точки подключения одной из обмоток трансформатора, то затухание контура возрастет и самовозбуждение станет невозможным. Обратная связь, затрудняющая самовозбуждение, т.е. увеличивающая устойчивость состояния равновесия, называется отрицательной. Следовательно, для создания автогенераторов необходимо использование положительной обратной связи.

2.3. Стационарный режим автогенератора

Точных аналитических методов решения нелинейных дифференциальных уравнений (за редким исключением) не существует. В связи с этим было разработано большое количество разнообразных методов приближенного анализа нелинейных цепей. Каждый метод обладает определенными преимуществами при решении круга задач. Наиболее распространенными методами являются: метод линеаризации; квазилинейный метод (метод гармонической линеаризации); метод медленно меняющихся амплитуд; метод фазовой плоскости; метод малого параметра; метод математического моделирования.

Наибольшее распространение для инженерных расчетов стационарных режимов автогенераторов получил квазилинейный метод, основанный на исследовании соотношений между первыми гармониками токов и напряжений и замене нелинейной элемента эквивалентным линейным, характеризуемым средним по первой гармонике параметром. После такой замены нелинейная цепь описывается линейными уравнениями и может исследоваться методами линейной теории (например методом комплексных амплитуд). Квазилинейный метод применим для систем, колебания в которых близки к гармоническим.

Рассмотрим схему автогенератора (см. рис.1) с контуром в выходной цепи усилителя, активным элементом которого могут быть биполярный или полевой транзистор. Благодаря значительной добротности (обычно порядка 50 – 200) колебательные контуры генераторов обладают большой избирательностью. Поэтому даже тогда, когда выходной ток усилителя сильно отличается от синусоидального из-за нелинейности АЭ, напряжения на контуре u_k и на входе АЭ u_b оказываются почти синусоидальными, лишь незначительно отличающимися от их первых гармоник u_{k1} , u_{b1} . Анализируемый генератор состоит из двух частей: нелинейной (АЭ) и линейной (контура и катушки связи). Запишем соотношения между комплексными амплитудами первых гармоник токов и напряжений. Нелинейный элемент будем характеризовать средней крутизной, определяемой отношением комплексных амплитуд тока \dot{I}_{k1} в выходной цепи АЭ к амплитуде напряжения возбуждения \dot{U}_{b1} на входе АЭ:

$$\mathfrak{S}_{cp} = \mathfrak{I}_{K1} / U'_{B1} \quad (13)$$

Вследствие нелинейности АЭ \mathfrak{S}_{cp} зависит от амплитуды \mathfrak{U}_{B1} . Пренебрегая влиянием напряжения \dot{U}_{K1} на ток \dot{I}_{K1} , получим из (13)

$$\mathfrak{I}_{K1} = \mathfrak{S}_{cp} U'_{B1} \quad (14)$$

Если первая гармоника тока \dot{i}_{K1} совпадает по фазе с первой гармоникой напряжения возбуждения u_{B1} , средняя крутизна оказывается действительной. Однако на практике при работе на достаточно высоких частотах в результате конечного времени прохождения носителей через прибор ток \dot{i}_{K1} отстает по фазе от u_{B1} . Поэтому в общем случае среднюю крутизну (13) следует считать комплексной.

Для линейной части схемы (см. рис. 1) при $i_{B1}=0$ имеем $\dot{U}_{K1} = \dot{I}_{K1} Z_{\Delta}$ и

$$U'_{B1} = \mathfrak{K}_{o.c.} U'_{K1} = \mathfrak{K}_{o.c.} Z_{\Delta} \mathfrak{I}_{K1} \quad (15)$$

причем комплексный коэффициент обратной связи $\mathfrak{K}_{o.c.} = \dot{U}_{B1} / \dot{U}_{K1} = M/L = K_{o.c.}$ оказывается действительным. Произведение $K_{o.c.} Z_{\Delta}$, характеризующее линейную часть схемы, называют управляющим сопротивлением:

$$Z_y = K_{o.c.} Z_{\Delta} \quad (16)$$

Подставляя (14) в (15), получим комплексное уравнение генератора:

$$\mathfrak{S}_{cp} \mathfrak{K}_{o.c.} Z_{\Delta} = 1 \quad (17)$$

Оно имеет очевидный физический смысл: в стационарном режиме комплексный коэффициент передачи по замкнутому контуру генератора равен единице. Если воспользоваться (16), придем к иной форме комплексного уравнения генератора:

$$\mathfrak{S}_{cp} Z_y = 1 \quad (18)$$

Представляя каждую из комплексных величин в показательной форме

$$\begin{aligned} \mathfrak{S}_{cp} &= S_{cp} e^{i\varphi_s}, \\ \mathfrak{K}_{o.c.} &= K_{o.c.} e^{i\varphi_k}, \quad Z_{\Delta} = Z_{\Delta} e^{i\varphi_z}, \end{aligned} \quad (19)$$

можем записать уравнение (17) в виде

$$S_{cp} K_{o.c.} Z_{\Delta} e^{i(\varphi_s + \varphi_k + \varphi_z)} = 1 \quad (20)$$

Уравнение (20) имеет место, если одновременно выполняются два условия:

$$\varphi_s + \varphi_k + \varphi_z = 0, 2\pi, \dots, 2\pi n \quad (21)$$

$$S_{cp} K_{o.c.} Z_{\Delta} = 1 \quad (22)$$

Соотношения (21), (22) являются важнейшими в теории автогенераторов, определяющими параметры стационарного режима. Выражение (21), называемое условием баланса фаз, означает, что в стационарном режиме сумма всех

фазовых сдвигов по замкнутому контуру генератора равна нулю или целому числу 2π . Поскольку каждый из сдвигов фаз, входящих в это выражение, зависит от частоты по-разному, в большинстве генераторов существует лишь одна частота ω_0 , на которой выполняется условие баланса фаз, т.е. на которой возможно генерирование колебаний. Таким образом, из условия баланса фаз определяется частота генерируемых колебаний.

Выражение (22), называемое условием баланса амплитуд, говорит о том, что в стационарном режиме коэффициент передачи по замкнутому контуру генератора равен единице. В этом условии две величины ($K_{0.c}$ и Z_3) от амплитуды колебаний не зависят, а одна (S_{cp}) зависит от U_{B1} . Следовательно, условие баланса амплитуд выполняется лишь при определенной амплитуде U_{B1} . Для определения амплитуды стационарных колебаний удобно (22) переписать в виде

$$S_{cp}(U_{B1}) = 1/K_{0.c}Z_3. \quad (23)$$

Рассмотрим (рис. 4) построенные зависимость $S_{cp}(U_{B1})$, называемую характеристикой средней крутизны, и прямую обратной связи, проведенную на уровне $1/K_{0.c}Z_3$. Точка пересечения этих зависимостей определяет стационарную амплитуду колебаний U'_{B1} , для которой выполняется условие баланса амплитуд. Если частота генерируемых колебаний равна резонансной частоте контура, то $Z_3=R_3$ и условие баланса амплитуд

$$S_{cp}(U_{B1}) = 1/K_{0.c}R_3. \quad (24)$$

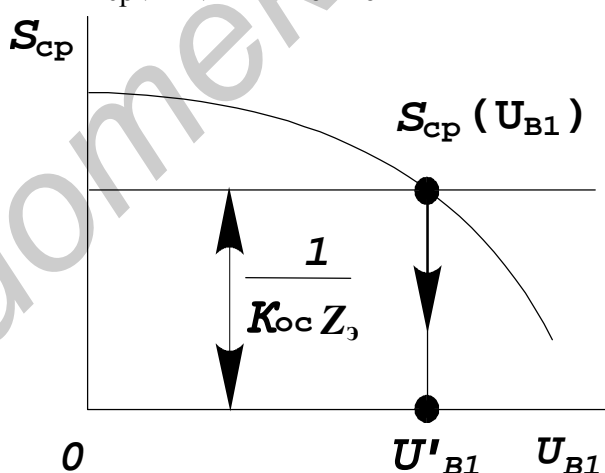


Рис.4

Стационарный режим будет устойчивым, если большая амплитуда U_{B1} станет затухать, т.е. если при $U_{B1} > U'_{B1}$ величина α_3 окажется положительной. Для этого требуется, чтобы

$$\partial S_{cp} / \partial U_{B1} < 0. \quad (25)$$

Таким образом, стационарный режим автоколебаний является устойчивым, если производная средней крутизны по амплитуде напряжения отрицательна.

2.4. Режимы возбуждения колебаний в автогенераторе

В квазилинейном методе для определения амплитуды стационарных колебаний применяется также подход, основанный на использовании колебательных характеристик.

Колебательной характеристикой называется зависимость амплитуды I_{K1} первой гармоники выходного тока нелинейного элемента от амплитуды U_B входного гармонического напряжения:

$$I_{K1} = \Phi_1(U_B). \quad (26)$$

Колебательная характеристика определяется по динамической вольт-амперной характеристике прибора (рис. 5): при выбранном смещении E_B для различных амплитуд входного напряжения ($U_B''' > U_B'' > U_B'$) строим графики тока i_k и рассчитываем амплитуды их первых гармоник I_{K1} . Для смещения E'_B , соответствующего участку с постоянной крутизной S , при небольших амплитудах U_B $I_{K1} = S U_B$. По мере увеличения U_B напряжение все больше заходит на участки меньшей крутизны, в результате чего рост амплитуды I_{K1} замедляется (рис. 6,а).

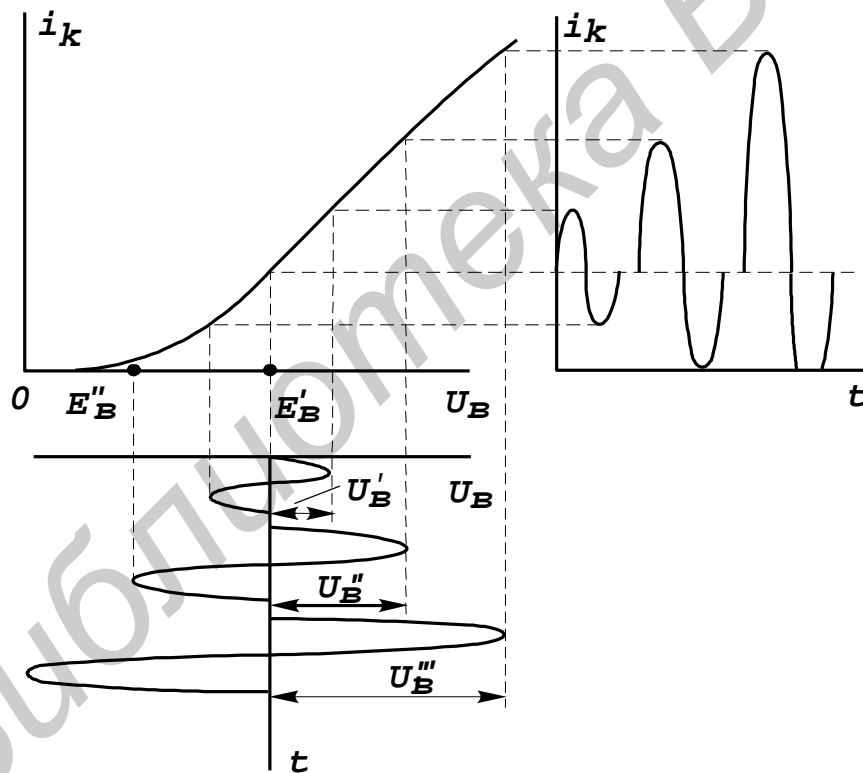


Рис.5

Если смещение E''_B соответствует нижнему загибу характеристики $i_k(u_B)$, то с увеличением U_B сначала I_{K1} растет быстрее U_B , а затем приблизительно пропорционально U_B , что приводит к колебательной характеристике II. При больших амплитудах U_B амплитуды I_{K1} всегда уменьшаются из-за влияния напряжения на нагрузку.

При любой амплитуде U_B средняя крутизна

$$S_{cp} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (27)$$

где α - угол наклона линии, соединяющей точку колебательной характеристики с началом координат. Рассмотрим характеристики средней крутизны $S_{cp}(U_B)$, соответствующие колебательным (I и II) (рис. 6, б). При малых U_B S_{cp} определяется крутизной S в рабочей точке $S_{cp}(0)=S$.

Режим работы генератора с характеристиками I называется мягким, а с характеристиками II - жестким. Отметим, что при характеристике II наибольшее значение S_{cp} соответствует точке A (см. рис. 6,а), в которой касательная к колебательной характеристике проходит через начало координат.

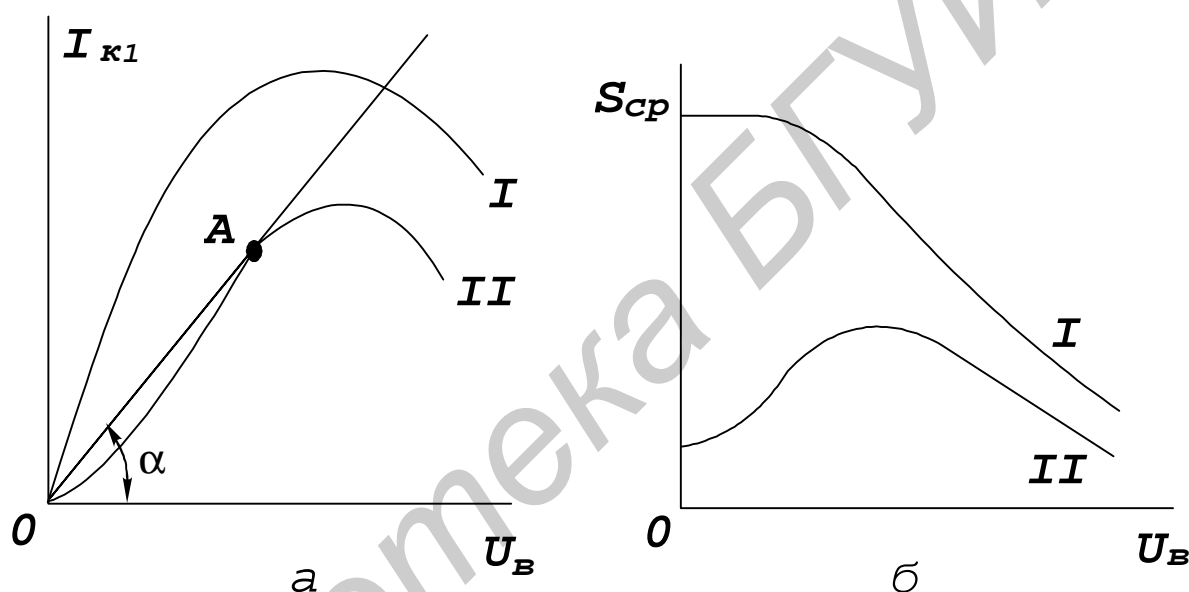


Рис.6

Следует отметить, что при анализе работы генератора в мягком режиме вольт-амперная характеристика его нелинейного элемента должна быть аппроксимирована полиномом не ниже третьей степени, а в жестком – не ниже пятой степени.

Рассмотрим особенности каждого режима.

Мягкий режим. Помимо колебательной характеристики $I_{K1} = \Phi(U_{B1})$ на схеме (рис. 7, а) построено семейство характеристик обратной связи, определяющих зависимость U_{B1} от I_{K1} через линейные элементы генератора. Эти характеристики будут соответствовать выражению (15), если в последнем заменить комплексные амплитуды на модули: $U_{B1} = K_{0,c} Z_{\vartheta} I_{K1}$. Решая это уравнение относительно I_{K1} и учитывая, что $K_{0,c} = M/L$, получаем уравнение характеристик обратной связи:

$$I_{K1} = (L/MZ_{\vartheta})U_{B1}. \quad (28)$$

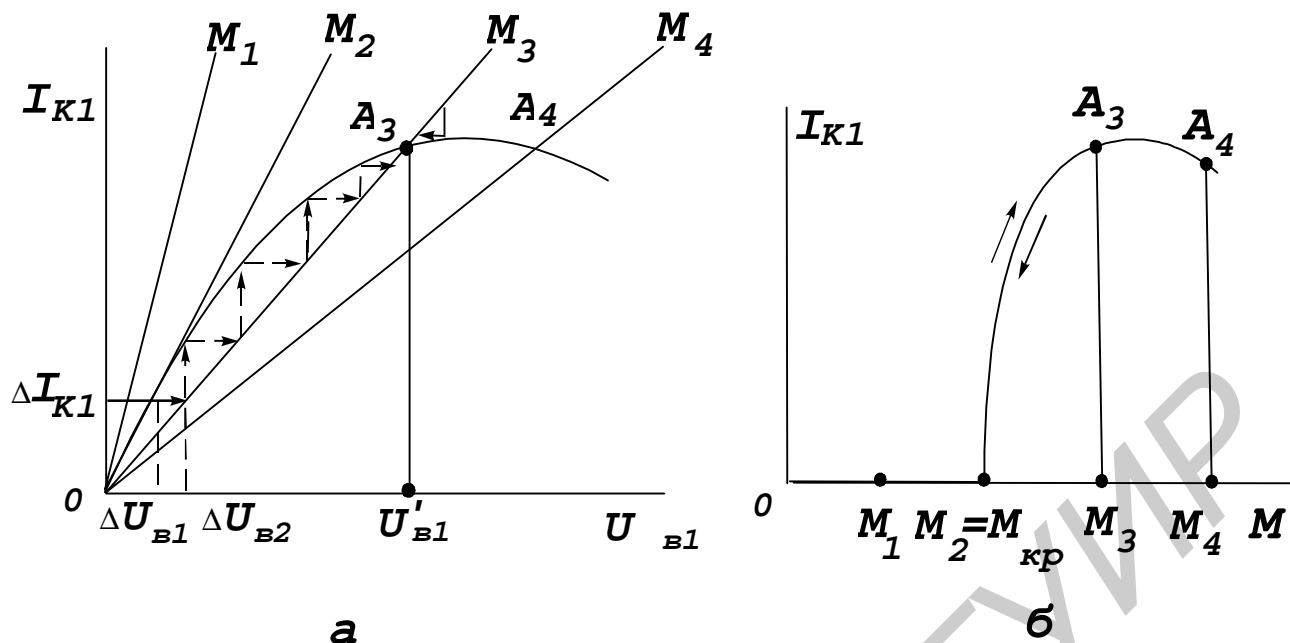


Рис.7

На этой же схеме приведены характеристики обратной связи для различных значений M : $M_1 < M_2 < M_3 < M_4$. Стационарным режимам соответствуют точки пересечения колебательной характеристики и характеристики обратной связи. При $M = M_3$ точек пересечения окажется две: точка O , соответствующая состоянию равновесия $U_{B1} = 0$, и точка A_3 , соответствующая динамическому режиму с амплитудой U'_{B1} . В каждой из них выполняется условие баланса амплитуд. Однако это еще не означает, что любой из этих режимов может быть получен. В реальных схемах может быть получен только устойчивый режим.

Для проверки устойчивости состояния равновесия (точки O) предположим, что за счет какого-то возмущения возникло колебание напряжения с небольшой амплитудой ΔU_{B1} . Это вызовет появление тока с амплитудой ΔI_{K1} , определяемой по колебательной характеристике. В свою очередь, этот ток создает напряжение на входе АЭ с амплитудой ΔU_{B2} , определяемой по характеристике обратной связи, причем $\Delta U_{B2} > \Delta U_{B1}$, что вызовет дальнейшее увеличение тока и т. д. В итоге амплитуда случайно возникшего колебания возрастает, т.е. состояние равновесия оказывается неустойчивым. Аналогично производится проверка устойчивости тока A_3 путем введения предположения о случайном отклонении амплитуды U_{B1} от U'_{B1} в сторону больших и меньших значений. При этом легко убедиться, что динамический режим, соответствующий точке A_3 , является устойчивым, так как небольшие отклонения затухают.

Стационарный режим является устойчивым, если в точке пересечения характеристик крутизна колебательной характеристики меньше крутизны характеристики обратной связи, и неустойчивым в противоположном случае. Применение этого критерия к точкам O и A_3 подтверждает сделанный ранее вывод о неустойчивости состояния равновесия и устойчивости динамического режима.

Графики (рис. 7, б) позволяют установить зависимость амплитуды колебаний, например I_{K1} , от изменения M , определяющей величину обратной связи. При увеличении M от нуля до $M_2 = M_{KP}$ единственным стационарным и притом устойчивым режимом является состояние равновесия. При $M > M_2$ появляются два стационарных режима, причем устойчивым оказывается динамический режим (точки A_3 и A_4). Поэтому при $M > M_2$ с ростом M амплитуда I_{K1} плавно изменяется (см. рис. 7,б). При уменьшении M амплитуда I_{K1} изменяется в соответствии с той же характеристикой, и при $M_2 = M_{KP}$ колебания исчезают.

Режим генератора, в котором амплитуда колебаний плавно меняется с изменением обратной связи, называется мягким режимом самовозбуждения колебаний.

Жесткий режим. Рассмотрим колебательную характеристику и семейство характеристик обратной связи для различных значений M ($M_1 < M_2 < M_3 < M_4$) (рис. 8,а). При $M = M_3$ характеристики пересекаются в трех точках, соответствующих трем стационарным режимам: O - состоянию равновесия, B_3 и A_3 - динамическим режимам с амплитудами U''_{B1} и U'_{B1} . Рассматривая процесс изменения I_{K1} и U_{B1} при небольших начальных отклонениях ΔU_{B1} от значений U_{B1} , соответствующих точкам O , B_3 и A_3 , убеждаемся в том, что точки O и A_3 соответствуют устойчивым, а точка B_3 - неустойчивому режимам.

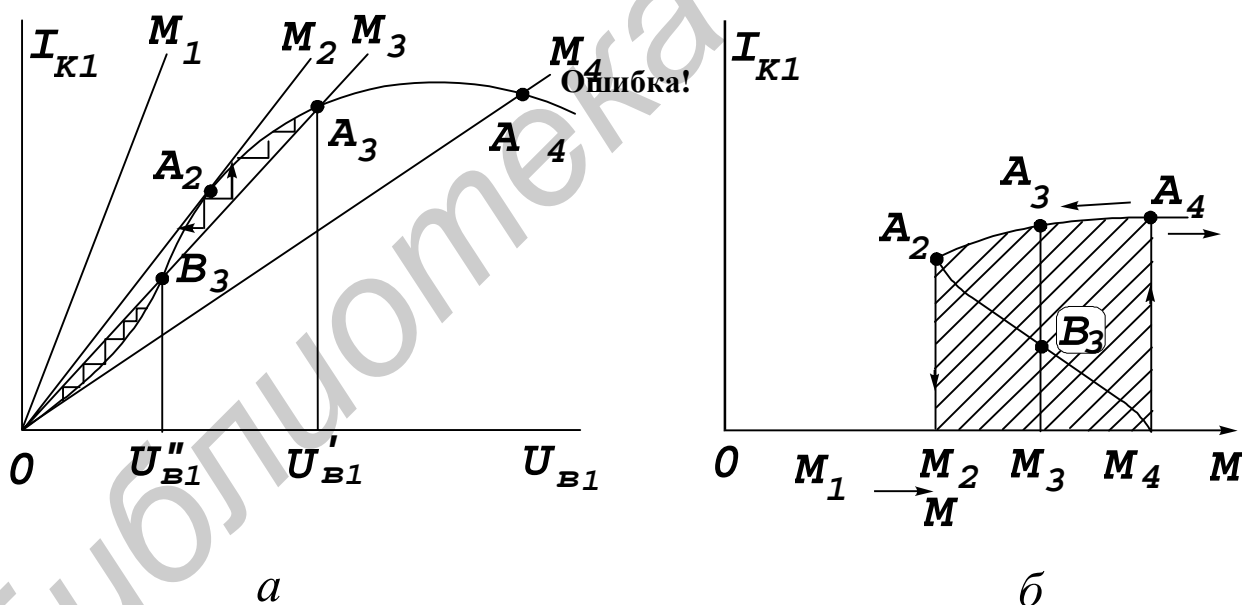


Рис.8

Определим зависимость амплитуды I_{K1} от величины обратной связи. При увеличении M от нуля до значения $M = M_4$, при котором характеристики оказываются касательными в начале координат, режим, соответствующий точке O , является устойчивым и малые флуктуации не вызывают нарастания колебаний. При $M = M_4$ режим, соответствующий точке O , становится неустойчивым и малые колебания сразу нарастают до больших амплитуд, соответствующих точке A_4 . При дальнейшем увеличении M изменение амплитуд происходит по колебательной характеристике. Если теперь уменьшать M до $M = M_2$, то при $M = M_4$,

так же как и при $M = M_3$, срыва колебаний не произойдет, так как динамические режимы, определяемые точками A_3 и A_4 , являются устойчивыми. Колебания сорвутся, когда M уменьшится до $M = M_2$, так как соответствующая ему точка A_2 неустойчива: небольшое уменьшение амплитуды U_{B1} вызовет ее дальнейшее уменьшение до нуля. Зависимость I_{K1} от M для жесткого режима построена на схеме (см. рис. 8, б): сплошным линиям соответствуют устойчивые режимы, пунктирной - неустойчивые.

Жесткий режим самовозбуждения колебаний характеризуется скачкообразным возникновением колебаний большой амплитуды при плавном увеличении обратной связи и скачкообразным срывом колебаний при уменьшении обратной связи. Между этими значениями обратной связи существует область затягивания (заштрихована, см. рис. 8 б) в пределах $M_2 < M < M_4$.

Если возбудить колебания в генераторе при $M \geq M_4$, а затем уменьшать M до значений, соответствующих этой области (например $M = M_3$), колебания в генераторе сохранятся. Если же увеличивать M до M_3 от значений, меньших M_2 , колебания в схеме не возникнут. В последнем случае колебания можно возбудить, если за счет какого-либо внешнего воздействия создать на короткое время колебания с амплитудой $U_{B1} > U''_{B1}$, дальше она сама увеличится до U'_{B1} . Этого иногда можно добиться за счет переходных процессов, возникающих при включении напряжения питания.

Автосмещение. В автогенераторах широко применяется автоматическое смещение, действие которого проиллюстрируем на примере схемы (рис. 9). Выберем исходное смещение на базе транзистора, соответствующего участку характеристики $i_K(u_6)$ с большой крутизной, на котором происходит мягкое самовозбуждение колебаний при небольшой взаимоиндукции M . В процессе нарастания амплитуды колебаний в цепи базы происходит детектирование колебаний, возрастание постоянной составляющей тока базы I_{60} , смещение рабочей точки транзистора, определяемой выражением $E'_6 = E_6 - I_{60}R_6$, влево (см. рис. 9). Уменьшение смещения на базе транзистора вызывает уменьшение средней крутизны коллекторного тока. При правильно выбранной величине R_6 переходный процесс в генераторе заканчивается установлением стационарного режима с отсечкой тока со свойственным ему более высоким КПД.

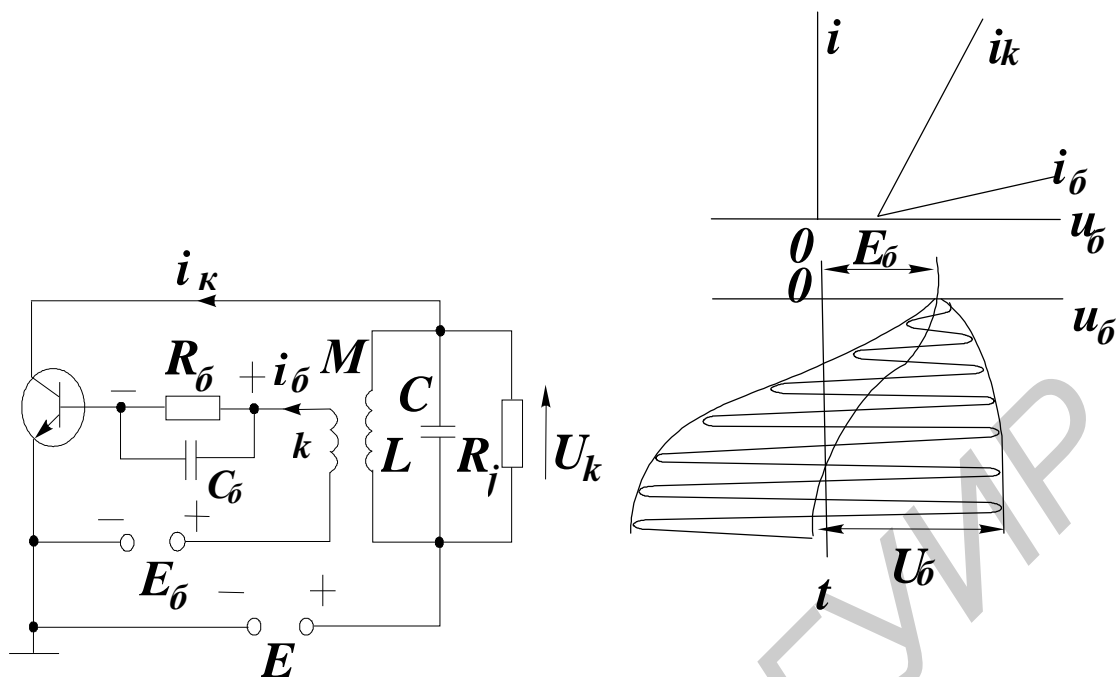


Рис. 9

Таким образом, применение автосмещения позволяет совместить режим мягкого самовозбуждения колебаний с достижением более высоких КПД в жестком режиме.

2.5. Эквивалентные схемы автогенераторов

На практике большей частью находит применение так называемая трехточечная схема транзисторного автогенератора (рис.10). В ней реактивные сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 (емкости и индуктивности) имеют малые потери и обра-

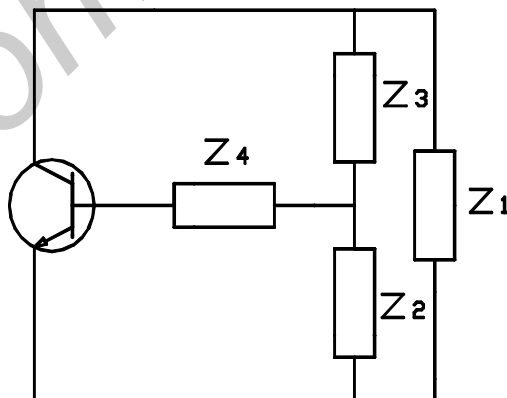


Рис.10

зуют высокодобротный колебательный контур. Иногда при компенсации фазовых сдвигов в транзисторе в схему включают дополнительное сопротивление Z_4 .

Для приведенной трехточечной схемы справедливо выражение

$$K_{o.c} = Z_2/Z_1, \quad (29)$$

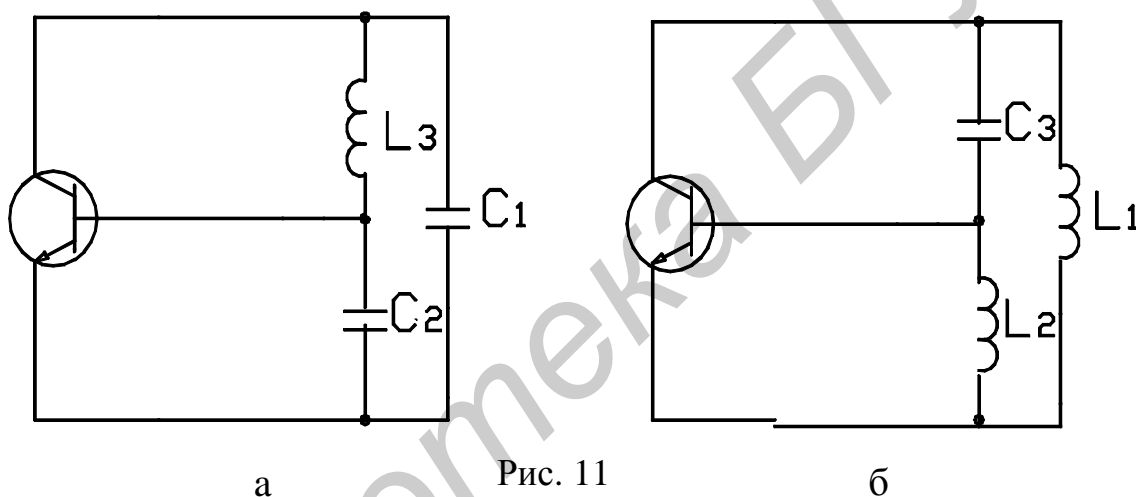
а при малых сопротивлениях потерь в элементах

$$K_{o.c} = X_2/X_1. \quad (30)$$

При сделанных выше допущениях коэффициент обратной связи – величина вещественная, т.е. $\varphi_K = 0$. При этом из уравнения (21) при $n = 0$ следует, что в стационарном режиме устанавливаются колебания такой частоты, при которой сдвиг фаз в транзисторе φ_S компенсируется сдвигом фаз в контуре φ_Z , т.е. $\varphi_Z = -\varphi_S$. Чем больше φ_S , тем сильнее расстроен колебательный контур. Следовательно, при сделанных допущениях колебания возникают на частоте контура, что, в свою очередь, позволяет находить частоту колебаний из уравнения

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0. \quad (31)$$

Используя выражение (31) и учитывая действительный характер коэффициента обратной связи, можно показать, что возможны два варианта эквивалентных трехточечных схем автогенераторов: емкостная (рис.11, а), когда $X_1 < 0, X_2 < 0, X_3 > 0$, и индуктивная (рис.11б), когда $X_1 > 0, X_2 > 0, X_3 < 0$.



2.6. Выбор режима работы автогенератора.

Выходная мощность автогенератора обычно играет существенную роль только в однокаскадных передатчиках. В многокаскадных передатчиках основные требования предъявляются к стабильности частоты АГ, которую невозможно улучшить в последующих каскадах. Поэтому в АГ с повышенной стабильностью транзистор должен работать в облегченном режиме. При этом напряжение источника коллекторного питания и амплитуду импульса коллекторного тока следует выбирать из условий:

$$I_{KM} = (0,2 \dots 0,4)I_{K \max}, \quad (32)$$

$$E_K = (0,3 \dots 0,5)U_{K \max}, \quad (33)$$

Однако следует отметить, что значительно усиливать неравенства (32) и (33) не рекомендуется, так как существенное уменьшение тока I_{KM} приводит к увеличе-

нию зависимости параметров транзистора от температуры и уменьшению отношения напряжений сигнал/шум на выходе автогенератора. Уменьшение E_k по сравнению с рекомендованным также является нецелесообразным, так как при этом возрастает отрицательное влияние выходной емкости на стабильность частоты генерируемых колебаний.

Режим работы транзистора в автогенераторе обычно выбирают критическим или недонапряженным, коэффициент использования коллекторного напряжения $\xi = (0,2 - 0,3)\xi_{гр}$, где $\xi_{гр}$ - значение коэффициента ξ в граничном режиме. Это объясняется тем, что при работе в перенапряженном режиме наблюдаются сильное влияние питающего напряжения на частоту генерируемых колебаний и возрастание модуля фазового угла средней крутизны, обусловленное увеличением уровня высших гармоник в напряжении базы. Переход в перенапряженный режим увеличивает также выходную проводимость транзистора, снижающую добротность колебательной системы.

Для обеспечения высокой стабильности амплитуды колебаний угол отсечки коллекторного тока в стационарном режиме выбирают из условия $60^\circ < \theta < 120^\circ$, а мягкий режим самовозбуждения при $\theta < 90^\circ$ создают с помощью фиксированного смещения. Наиболее часто применяют комбинированную схему автосмещения, состоящую из делителя в цепи базы транзистора и резистора $R_э$ в эмиттерной цепи. В этом случае также снижается чувствительность параметров транзистора к изменению температуры окружающей среды и напряжения источника коллекторного питания. Опыт проектирования транзисторных автогенераторов показывает, что существует оптимальное значение $R_э = R_{э.опт}$, обеспечивающее максимальную стабильность частоты

$$R_{э.опт} = (25 \dots 30)/S_0. \quad (34)$$

Кроме этого, для выбора режима автогенератора, работающего в диапазоне частот или нагруженного на цепь с меняющимися параметрами, необходимо знать нагрузочные характеристики. Последние показывают, как изменяются напряжения, токи, мощности, частота от величины сопротивления внешней нагрузки при постоянных напряжениях питания и заданных параметрах цепи смещения. Для получения высокой стабильности частоты транзисторные автогенераторы чаще всего выполняются по схеме емкостной трехточки и реже индуктивной.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрим схемы исследуемых автогенераторов, входящих в лабораторную установку: емкостную трехточку (рис.12) и индуктивную трехточку (рис.13). АГ построены по схеме с общим эмиттером и заземленным по ВЧ коллектором. Положению переключателя П1 «ЕТ» соответствует емкостная трехточка с частотой генерации порядка 370 кГц, положению П1 «ЕТ1» - емкостная трехточка с частотой 270 кГц и положению П1 «ИТ2 – индуктивная трехточка с частотой генерации 270 кГц. Для наблюдения формы коллекторного тока в цепь коллектора включен резистор $R_K = 75 \text{ Ом}$. Для изменения частоты генерации генератора, построенного по емкостной трехточечной схеме, с 370 до 270 кГц параллельно колебательному контуру переключателем П1 включается емкость C_4 .

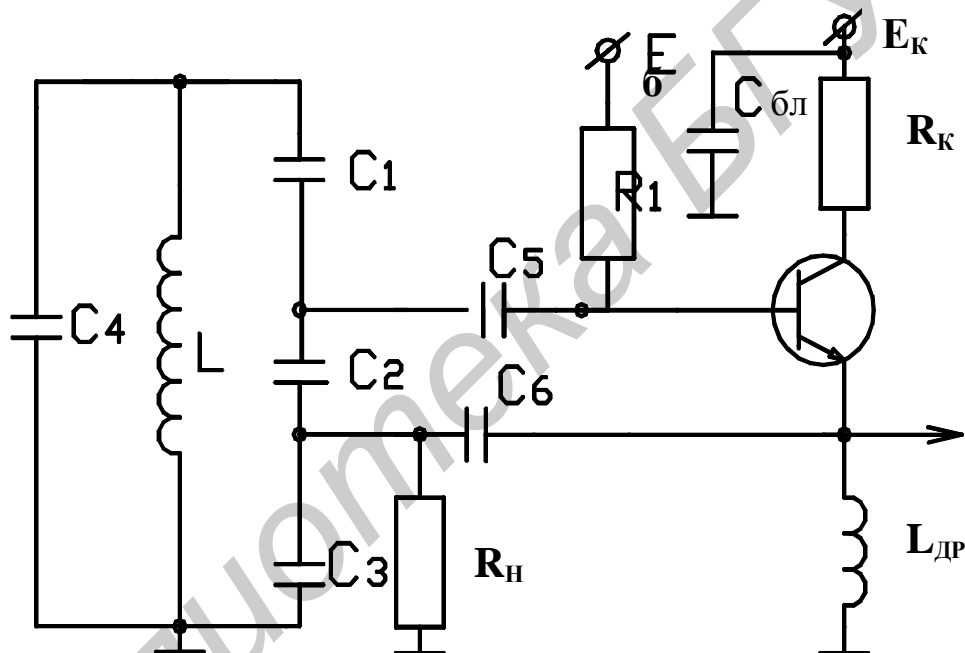


Рис. 12

Нагрузка автогенератора R_H чисто активная, включена в эмиттерную цепь. С помощью переключателя П2 ее величина изменяется с 56 Ом (первое положение) до 616 Ом с шагом 56 Ом. Напряжение смещения в цепь базы подается от источника $E_б$ через резистор R_1 . Величина напряжения коллекторного питания контролируется вольтметром, установленным на передней панели. Переключатель П3 позволяет использовать вольтметр для измерения напряжений и токов, указанных на панели. При измерении токов используется вольтметр осциллографа С1-114, который подключается к макету лабораторной установки через специальную насадку.

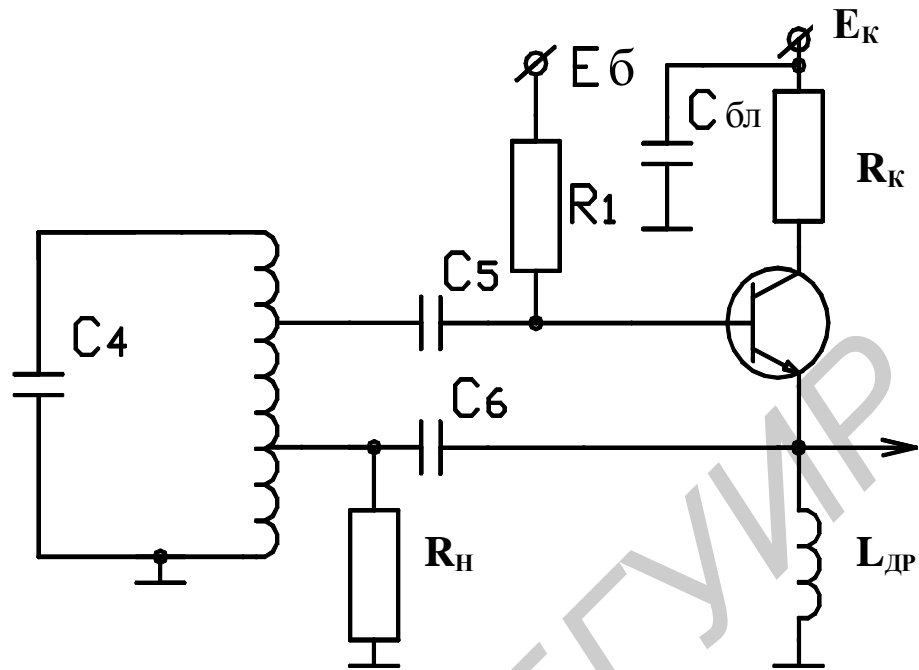


Рис. 13

В макете лабораторной установки также предусмотрена возможность исследования генератора с внешним возбуждением (переключатель П4), коллекторной и базовой модуляции. В связи с этим некоторые элементы коммутации и контроля, вынесенные на переднюю панель, в данной лабораторной работе не используются.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Прежде чем приступить к выполнению работы, следует ознакомиться со схемой установки и измерительными приборами: универсальным осциллографом С1-114 и частотомером ЧЗ-44.

4.1. Подготовка макета к работе

Подключить частотомер к клемме «F», осциллограф С1-114 - к клеммам «Осц.1» и «Осц.2», вход «U» вольтметра осциллографа – к клемме «Вольтметр» макета прибора.

Переключатель П3 установить в положение « $I_{к0}$ », переключатель П4 – в положение « I_k », переключатель «Модуляция» - в выключенное положение, переключатель П2 установить в первое положение, что соответствует сопротивлению нагрузки $R_n=56$ Ом. Ручки потенциометров « E_k », « $E_б$ » и « $I_б$ » должны находиться в крайнем левом положении.

Включить макет и измерительные приборы в сеть.

4.2. Исследование автогенератора, построенного по емкостной трехточечной схеме

Переключатель П1 установить в положение «ЕТ».

С помощью потенциометра «Е_к» установить напряжение коллектора, равное 7 В.

Изменяя смещение при помощи потенциометра I_б, получить на экране осциллографа изображение, соответствующее устойчивой генерации. При этом на экране будут наблюдаться последовательность импульсов коллекторного тока и переменное выходное высокочастотное напряжение (U_{мэ}).

Потенциометром I_б установить по форме импульса выходного тока (максимальная амплитуда и уплощение на вершине импульса) критический режим работы АЭ. Изменяя величину сопротивления нагрузки (переключатель П2) от 56 до 616 Ом, снять нагрузочные характеристики I_{к0}, U_{мэ}, f, P₀, P₁, η = φ(R_н).

Выходное напряжение (U_{мэ}) измерять по осциллографу, а постоянную составляющую коллекторного тока (I_{к0}) измерять вольтметром осциллографа С1-114 с помощью специальной насадки. Значения P₀, P₁, η рассчитать по формулам:

$$P_0 = E_k I_{k0}; \quad P_1 = \frac{U_{мэ}^2}{2R_n}; \quad \eta = \frac{P_1}{P_0}$$

Снятые и рассчитанные значения занести в табл. 1, по ним построить нагрузочные характеристики: P₀, P₁, η, f = φ(R_н).

Таблица 1

№ измер.	1	2	3	4	...	10
R _н , Ом						
E _к , В						
I _{к0} , мА						
U _{мэ} , В						
f, кГц						
P ₀ , мВт						
P ₁ , мВт						
η, %						

Потенциометром «I_б» установить недонапряженный режим работы автогенератора (импульс тока имеет остроконечную форму и амплитуду меньшую, чем в критическом режиме). В соответствии с вышеизложенной методикой снять, рассчитать и построить нагрузочные характеристики для недонапряженного режима работы автогенератора.

Переключатель «П1» установить в положение «ЕТ1», рабочая частота автогенератора должна при этом измениться. В соответствии с вышеизложенной методикой снять нагрузочные характеристики для критического и недонапряженного режимов работы второй емкостной трехточечной схемы автогенератора.

4.3. Исследование автогенератора, построенного по индуктивной трехточечной схеме

Переключатель «П1» установить в положение «ИТ». Повторить измерения, согласно п.4.2, для критического и недонапряженного режимов работы автогенератора. Провести необходимые расчеты и построить нагрузочные характеристики.

4.4. Исследование влияния E_к на частоту генерации

Переключатель П1 поставить в положение "ЕТ1".

Установить напряжение коллекторного питания E_к = 5 В, потенциометром I_б - критический режим работы АЭ. Изменяя E_к от 2 В до 8 В, снять зависимость $f = \Phi(E_k)$. При этом отмечать по форме импульса выходного тока напряженность режима работы АЭ. Полученные данные занести в табл. 2.

Измерения повторить для индуктивной трехточки (с переключателем П1 в положении "ИТ").

Таблица 2

E _к , В						
ЕТ1	f, кГц					
	Напряженность режима					
ИТ	f, кГц					
	Напряженность режима					

По данным таблицы построить зависимость $f = \Phi(E_k)$.

5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 5.1. Принципиальные схемы исследуемых автогенераторов.
- 5.2. Таблицы экспериментальных измерений и результатов расчетов (6 таблиц).
- 5.3. Графики зависимостей : η , P_0 , P_1 , $I_{к0}$, $f = \varphi(R_H)$.
- 5.4. Выводы о работе автогенераторов, построенных по емкостной и индуктивной трехточечным схемам.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 6.1. Структурная схема АГ с внешней обратной связью.
- 6.2. Пояснить механизм возникновения колебаний в АГ.
- 6.3. Дифференциальное уравнение АГ и его решение.
- 6.4. Условия нарастания колебаний в АГ.
- 6.5. Особенности квазилинейного метода анализа стационарного режима АГ.
- 6.6. Комплексное уравнение АГ, его физический смысл.
- 6.7. Уравнение баланса фаз, его физический смысл.
- 6.8. Уравнение баланса амплитуд, его физический смысл.
- 6.9. Условие устойчивости стационарного режима АГ.
- 6.10. Понятие автоколебательной характеристики.
- 6.11. Мягкий режим возбуждения колебаний в АГ.
- 6.12. Жесткий режим возбуждения колебаний в АГ.
- 6.13. Особенности схемы АГ с автосмещением.
- 6.14. Эквивалентная трехточечная схема АГ.
- 6.15. Емкостная трехточечная схема АГ.
- 6.16. Индуктивная трехточечная схема АГ.
- 6.17. Особенности выбора режима работы АГ с высокой стабильностью частоты.
- 6.18. Принципиальная схема АГ с индуктивной обратной связью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей: Учеб. пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 1982. -280 с.
2. Радиопередающие устройства/ Под ред. В.В. Шахгильдяна. - М.: Радио и связь, 1990. - 432 с.
3. Радиопередающие устройства/ Под ред. М.В. Благовещенского и Г.М.Уткина. - М.: Радио и связь, 1982. - 408 с.

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

Методические указания
к лабораторной работе
по курсу "Радиопередающие устройства"
для студентов специальностей "Радиотехника",
"Радиоэлектронные системы",
"Проектирование и производство радиоэлектронных средств"
всех форм обучения

Составители:

Ползунов Владимир Васильевич,
Титович Николай Алексеевич

Редактор Н.А. Бебель
Корректор Е.Н. Батурчик
Компьютерная верстка В.М. Ничипорвич

Подписано в печать

Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 1,0.

Печать ризографическая.

Тираж 100 экз.

Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л.

Заказ 49.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6