

УДК 621.391

Генератор гармонических колебаний: Для студентов-радиофизиков / Сост. А.В.Силин, Е.И.Шкелев. - Н.Новгород: ННГУ, 1994. - 25 с.

Методические указания содержат: краткое изложение принципа работы схемы автогенератора; описание экспериментальной установки и задание к выполнению работы.

Адресовано студентам-радиофизикам.

Рис. 16

Составители канд. техн. наук А.В.Силин
канд. техн. наук Е.И.Шкелев

Нижегородский государственный университет
им. Н.И.Лобачевского, 1994

Назначение автогенератора.

Данное устройство служит источником незатухающих колебаний синусоидальной формы с управляемой частотой.

Области использования.

Автогенераторы находят широкое применение в радиотехнике (возбудители в радиопередатчиках, гетеродины в радиоприемниках), в измерительной технике (задающие генераторы в генераторах стандартных сигналов, опорные генераторы в схемах автоподстройки частоты), в устройствах автоматики и электронной техники (например, в электронных часах) и т.д.

К наиболее важным техническим характеристикам автогенераторов относятся: диапазон рабочих частот, стабильность и точность выставления частоты, уровень гармоник в спектре выходного сигнала, уровень выходного сигнала.

Принцип работы схемы автогенератора

Любой автогенератор представляет собой нелинейное устройство, преобразующее энергию источника питания (источника постоянного напряжения) в энергию колебаний. При широком разнообразии известных схем автогенераторов каждая из них, помимо источника питания, должна иметь усилитель и цепь обратной связи. Поэтому в обобщенном виде схема автогенератора (см. рис. 1) содержит четырехполосник в прямой цепи, соответствующий резонансному усилителю, и четырехполосник в обратной цепи. (Обратите внимание на взаимное расположение входов и выходов четырехполосников).

Простейшая схема автогенератора (схема с трансформаторной обратной связью), где в качестве активного элемента резонансного усилителя использован транзистор, приведена на рис. 2. На рис. 2 пунктиром выделен четырехполосник обратной связи.

При изучении автогенератора первостепенное значение имеют два вопроса:

1. Механизм и условия возникновения колебаний.
2. Существование стационарных колебаний и их устойчивость.

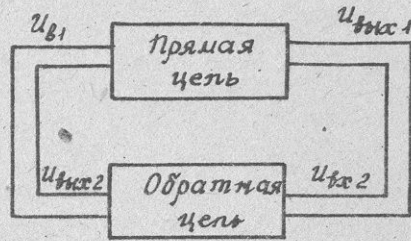


Рис. 1

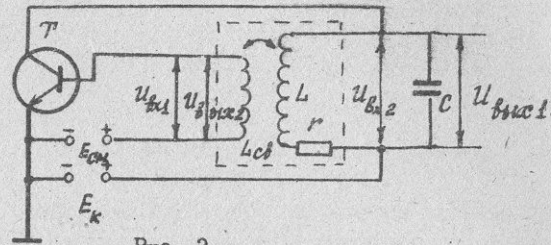


Рис. 2

Самовозбуждение автогенератора

При включении в схему автогенератора (рис.2) источников питания и при выполнении далее обсуждаемых условий в схеме возникают автоколебания. Механизм их возникновения заключается в следующем. Скачек напряжения на коллекторе приведет к быстрому изменению выходного тока транзистора, что вызовет ударное возбуждение резонансного контура. Возникшие в контуре колебания через трансформаторную связь проникают на базу транзистора и вызовут переменную составляющую выходного тока. При соответствующих условиях этот ток будет в фазе с током в резонансном контуре, и в результате возникшие за счет скачка напряжения питания собственные колебания в контуре могут со временем не только не ослабевать, но и усиливаться. По мере увеличения уровня колебаний все в большей степени будет проявляться нелинейность характеристик транзистора,

что, в свою очередь, приведет к снижению скорости нарастания колебаний в контуре, а затем и к прекращению их роста - колебания приобретают стационарный характер.

При возникновении автоколебаний их уровень на некотором начальном интервале времени остается весьма малым. По этой причине при обсуждении условий самовозбуждения можно пользоваться линейной моделью в виде двух линейных четырехполюсников, соединенных по схеме рис. 1. Обозначим через $K_1(\omega)$ и $K_2(\omega)$ комплексные коэффициенты передачи четырехполюсников прямой и обратной цепи соответственно

$$K_1(\omega) = \frac{\dot{U}_{вых1}}{\dot{U}_{в1}}$$

$$K_2(\omega) = \frac{\dot{U}_{вых2}}{\dot{U}_{в2}}$$

где \dot{U} - комплексная амплитуда колебания.

Перерисуем схему рис. 1 в более удобном для обсуждения вида (см. рис. 3). Легко заметить, что при $\dot{U}_{в2} = 0$, схемы рис.1 и рис.3 совпадают.

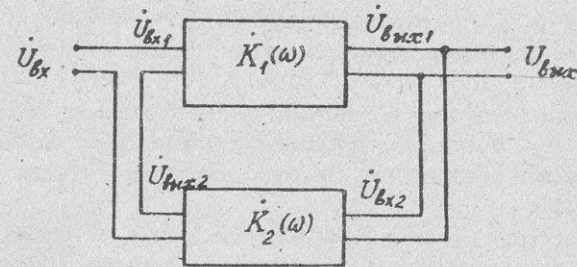


Рис. 3

Для линейного четырехполюсника (рис.3) введем комплексный коэффициент передачи $K(\omega)$

$$K(\omega) = \dot{U}_{вых} / \dot{U}_{вх}$$

Поскольку

$$\dot{U}_{вых} = \dot{U}_{вых1} = \dot{U}_{вх1} \cdot K_1(\omega) =$$

$$= [\dot{U}_{ix} + K_2(\omega) \dot{U}_{ix1}] \dot{K}_1(\omega),$$

то
$$\dot{K}(\omega) = \frac{\dot{K}_1(\omega)}{1 - K_1(\omega) K_2(\omega)}$$

Наличие особой точки у комплексной функции $\dot{K}(\omega)$ при условии $1 - K_1(\omega) K_2(\omega) = 0$

физически можно интерпретировать следующим образом: схема рис.3 при выполнении условия $1 - K_1(\omega) K_2(\omega) = 0$ выдает на выходе колебание с ненулевой амплитудой при бесконечно малой (нулевой) амплитуде колебания на входе. Следовательно, схема рис.3 при названных условиях является автогенератором.

Условия самовозбуждения вытекают из равенства $1 - K_1(\omega) K_2(\omega) = 0$.

Отсюда

$$|K_1(\omega)| \cdot |K_2(\omega)| = 1, \quad \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n, \quad (I)$$

где $\varphi_1(\omega)$ и $\varphi_2(\omega)$ - аргументы функций $K_1(\omega)$ и $K_2(\omega)$; n - целое число. Первое условие получило название "баланс амплитуд", второе - "баланс фаз".

Равенства (I) можно рассматривать как уравнения относительно переменной ω . Корни этих уравнений являются теми частотами, на которых возможно возбуждение. Частота генерации - корень системы уравнений (I).

Таким образом, если в схеме автогенератора на какой-либо частоте ω^* модуль комплексного коэффициента передачи разомкнутого кольца обратной связи $|K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)|$ равен 1, а суммарный набег фаз при прохождении сигнала с этой частотой по тому же кольцу составит $2\pi n$, то в схеме произойдет самовозбуждение. Частота генерируемых колебаний будет равна ω^* .

Выполнение условий самовозбуждения, по существу, означает, что возникшие колебания схемой автогенератора будут поддерживаться на неизменном уровне; неизбежные потери в кольце обратной связи полностью скомпенсированы.

Если условие $|K_1(\omega) K_2(\omega)| = 1$ не выполнено, имеем

$$I) |K_1(\omega) K_2(\omega)| = 0 \quad \text{при} \quad K_2(\omega) = 0$$

- резонансный усилитель;

$$2) |K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)| < 1 \quad \text{при} \quad \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n$$

- регенеративный усилитель;

$$3) |K_1(\omega) \cdot K_2(\omega)| > 1 \quad \text{при} \quad \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n$$

- генератор нарастающих колебаний.

Рассмотрим каждый из этих случаев.

I. Резонансный усилитель

При малом уровне входного сигнала усилитель работает в линейном режиме: $K(\omega)$ является его исчерпывающей характеристикой.

При возрастании амплитуды входного колебания $U_{ix}(t) = U_0 \cos \omega_0 t$ линейность усилителя будет нарушена. Аппроксимировав проходную динамическую характеристику транзистора $i_k = f(U_{ix})$ степенным полиномом степени N , выходной ток усилительного каскада можно записать в виде

$$i_{ix} = \sum_{n=0}^N b_n U_{ix}^n, \quad (2)$$

где b_n - постоянные коэффициенты.

Подставив в (2) выражение для $U_{ix}(t)$, находим амплитуду первой гармоники выходного тока в виде

$$I_1 = U_0 [b_1 + \frac{3}{4} b_3 U_0^2 + \frac{5}{8} b_5 U_0^4 + \dots] \quad (3)$$

По аналогии с линейным случаем, где

$$I_1 = S_0 U_0,$$

S_0 - крутизна в рабочей точке, для нелинейного усиления можно записать

$$I_1 = S_{cp}(U_0) \cdot U_0, \quad (4)$$

$S_{cp}(U_0)$ - средняя крутизна, которая находится из (3) в соответствии с определенным

$$S_{cp} = I_1 / U_0,$$

$$S_{cp}(U_0) = b_1 + \frac{3}{4} b_3 U_0^2 + \frac{5}{8} b_5 U_0^4 + \dots \quad (5)$$

Как следует из (5), зависимость $S_{cp}(U_0)$ полностью определяется коэффициентами аппроксимирующего полинома β_{2n+1} , а сами коэффициенты зависят как от типа электронного прибора, и нагрузки, так и от режима его работы.

Чтобы выяснить характер зависимости $S_{cp}(U_0)$, рассмотрим рис. 4а, где изображены проходная характеристика транзистора и ее крутизна.

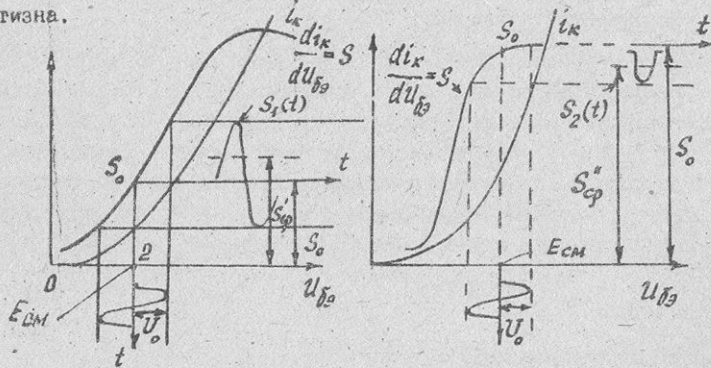


Рис. 4а

Рис. 4б

Различие рисунков 4а и 4б состоит в том, что в первом случае с помощью смещения E_{CM} рабочая точка выбрана на нелинейном участке проходной характеристики, во втором случае - на линейном, где в окрестности рабочей точки $S \approx const$. При воздействии на усилитель входного синусоидального напряжения с достаточно большой амплитудой U_0 крутизна характеристики описывается периодическими функциями времени $S_1(t)$ и $S_2(t)$, а постоянные составляющие S'_{cp} и S''_{cp} являются значениями средней крутизны, соответствующими амплитуде U_0 . Нетрудно заметить, что при увеличении амплитуды входного колебания в случае рис. 4а $S_{cp}(U_0)$ будет возрастать, в случае рис. 4б - падать. На рис. 5 представлены два характерных вида зависимости $S_{cp}(U_0)$, при этом кривая 1 соответствует рис. 4а, кривая 2 - рис. 4б.

Зависимость (4) амплитуды первой гармоники выходного тока I_1 от амплитуды колебания на входе U_0 , получившая название "колебательной характеристики", в соответствии с кривыми рис. 5 также имеет два характерных вида. На рис. 6 кривая 1 и 2 соответствуют кривым 1 и 2 рис. 5. Поскольку при настройке контура усилите-

ля на частоту усиливаемого сигнала фаза напряжения на контуре $U_k(t)$ совпадает с фазой первой гармоники тока, то кривые рис. 6 отражают и характер зависимостей $U_k = f(U_0)$.

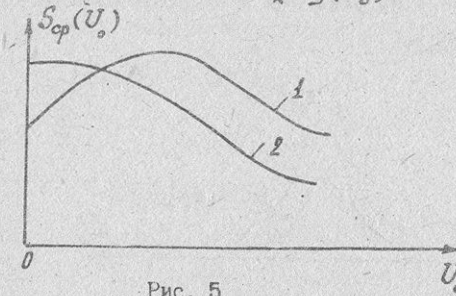


Рис. 5

Коэффициент усиления по первой гармонике при работе усилителя в режиме большого сигнала $K(\omega_0)$ в соответствии с (4) и рис. 6 является зависимым от U_0 .

$$K(\omega_0) = U_{k1} / U_{kx} = U_k / U_{kx} = f(U_0). \quad (6)$$

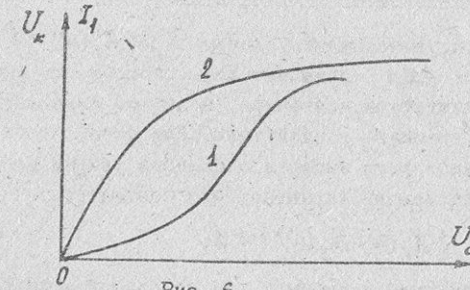


Рис. 6

2. Регенеративный усилитель

При положительной обратной связи в усилителе, т.е. при $\varphi_1(\omega_0) + \varphi_2(\omega_0) = 2\pi n$, при $0 < |K_1(\omega_0)K_2(\omega_0)| < 1$ автоколебания в схеме рис. 2 отсутствуют, а сама она представляет собой регенеративный усилитель. В радиотехнике под регенерацией подразумевается частичная компенсация потерь в колебательной системе с помощью положительной обратной связи. Явление регенерации позволяет повысить коэффициент усиления усилителя и его избир-

рательность. Компенсация потерь увеличивает добротность контура. На рис. 7 иллюстрируется влияние степени связи (т.е. величины $|K_2(\omega_0)|$) на усиление и избирательность.

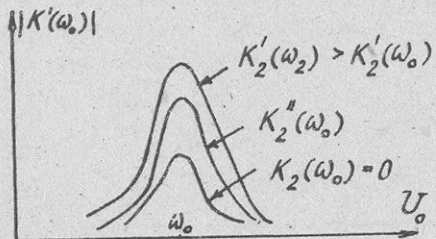


Рис. 7

Наряду с отмеченными положительными свойствами регенеративного усилителя, ему свойственен и существенный недостаток - опасность возбуждения усилителя за счет случайных изменений $K_1(\omega)$.

3. Ограничение нарастающих колебаний.
Стационарный режим автогенератора

Строго говоря, выполнение условия $K_1(\omega)K_2(\omega) = 1$, при $\varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n$ означает лишь способность схемы рис. 3 поддерживать незатухающие колебания, если они возникнут в ней за счет какого-либо внешнего воздействия. Для того, чтобы автоколебания достигли некоторого наперед заданного уровня необходимо обеспечить им нарастающий характер, что соответствует условию

$$|K_1(\omega)K_2(\omega)| > 1.$$

По мере роста амплитуды колебаний все в большей мере будет проявляться нелинейность усилителя в прямой цепи. При этом средняя крутизна в соответствии с рис. 5 будет уменьшаться, снижая $K_1(\omega_0)$. Снижение $K_1(\omega_0)$, в конечном итоге, приведет к тому, что будет выполнено условие

$$K_2(\omega_0) \cdot K_1(\omega_0) = 1.$$

На этом рост амплитуды колебаний прекратится: переходный режим завершится, наступит стационарный режим автогенератора.

Определение стационарной амплитуды колебаний удобно проводить с использованием колебательной характеристики (рис. 8)

На рис. 8 в одной системе координат представлены две зависимости (см. рис. 2).

$$U_{внх1} = K_1(\omega_0)U_{вх1}$$

- колебательная характеристика, (кривая 1),

$$U_{вх2} = \frac{1}{K_2(\omega_0)} U_{внх2}$$

или

$$U_{внх1} = \frac{1}{K_2(\omega_0)} U_{вх1}$$

- прямая обратной связи (кривая 2).

Точка пересечения кривых 1 и 2 (т.а) означает

$$K_1(\omega_0) = 1/K_2(\omega_0)$$

или

$$K_1(\omega_0) \cdot K_2(\omega_0) = 1, \quad (7)$$

т.е. соответствует стационарной амплитуде автоколебаний.

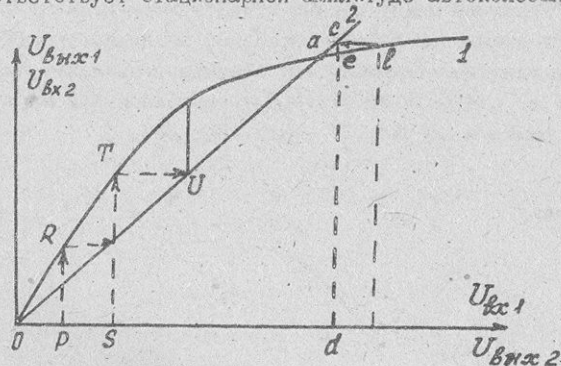


Рис. 8

Отметим, что точка 0 тоже удовлетворяет условию (7) и соответствует второму стационарному состоянию. Убедимся, что т. а соответствует устойчивому стационарному состоянию, а т. 0 - неустойчивому.

Пусть схема находится в т. O . Если флуктуация приведет к амплитуде ρ напряжения база-эмиттер, то амплитуда напряжения на контуре будет R ; по обратной связи это вызовет увеличение амплитуды напряжения база-эмиттер до величины S , что, в свою очередь, вызовет переход в т. T и т.д., пока схема не придет к точке a .

Проведем аналогичные рассуждения относительно состояния в т. a . Пусть флуктуация выведет амплитуду напряжения на контуре из т. a в т. b . Через обратную связь (через точку c) это вызовет амплитуду напряжения база-эмиттер величиной d , но ей будет соответствовать амплитуда e напряжения на контуре. Другими словами, схема вернется в состояние a , что и доказывает устойчивость этого состояния.

Совершенно аналогичным путем легко доказать устойчивость состояний O и a и неустойчивость состояния b для схемы, имеющей иной вид колебательной характеристики (рис. 9).

Режим возбуждения автогенератора, проиллюстрированный рис. 8, называют мягким, режим, соответствующий рис. 9 - жестким режимом возбуждения. Различие между мягким и жестким режимами возбуждения, выявляемое при сравнении рис. 8 и рис. 9, наглядно прослеживается и в характере зависимости амплитуды стационарных колебаний от степени связи, т.е. от величины $K_2(\omega_0)$ представленной на рис. 10 для мягкого режима и на рис. 11 - для жесткого.

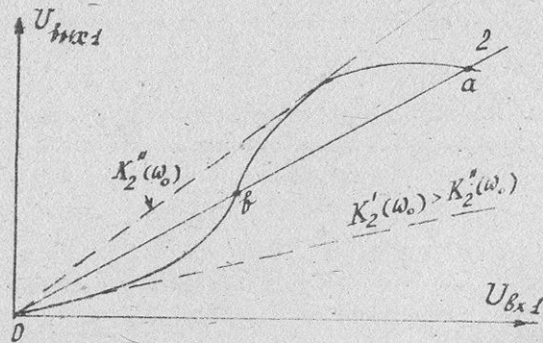


Рис. 9

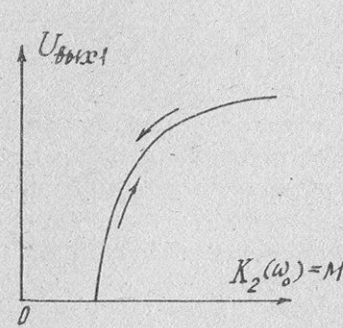


Рис. 10

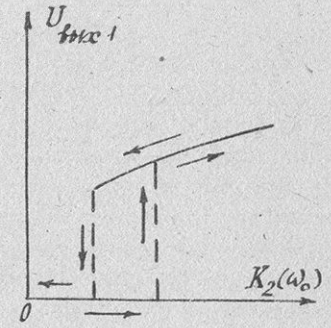


Рис. 11

Наличие петли гистерезиса на рис. 11 объясняется тем, что колебания возникают при связи, большей, чем связь, при которой происходит срыв колебаний. Это обстоятельство становится ясным из рис. 9: колебания возбуждаются при связи $K_2'(\omega_0)$, а срываются при $K_2''(\omega_0) < K_2'(\omega_0)$.

Следует заметить, что для возникновения колебаний в автогенераторе с жестким режимом возбуждения необходим внешний толчок, достаточный, чтобы вывести схему вверх через порог, задаваемый точкой b (см. рис. 9).

Анализ схемы автогенератора

Существует множество различных вариантов технической реализации автогенератора.

Простейшая схема автогенератора с индуктивной обратной связью, где в качестве усилительного элемента использован транзистор, приведена на рис. 2. Здесь избирательность по частоте обеспечивается параллельным колебательным контуром, включенным в коллекторную цепь транзистора T .

Колебательный контур, собственные потери которого характеризуются сопротивлением r , на резонансной частоте $\omega_0 = 1/LC$

имеет сопротивление $R = \rho^2/r$, где $\rho = \sqrt{L/C}$. Добротность контура $Q = \rho/r \gg 1$.

Для анализа процессов, происходящих в генераторе, воспользуемся его эквивалентной схемой по переменному току, изображенной на рис. 12. Коллекторный ток

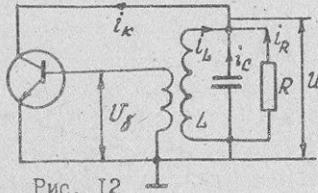


Рис. 12

на рис. 12. Коллекторный ток $i_k = i_c + i_R + i_L$, где $i_c = C(dU_k/dt)$; $i_L = \frac{1}{L} \int U_k dt$; $i_R = U_k/R$ - соответственно ток через емкость, сопротивление и индуктивность колебательного контура.

Если рассматривать ту область частот, где инерционными свойствами транзистора, т.е. зависимостью его параметров от частоты, можно пренебречь, то ток коллектора в зависимости от напряжений на базе U_B и на коллекторе U_K транзистора можно представить в виде функции $i_k(t) = i_k(U_B(t), U_K(t))$. Приемлимой аппроксимацией является представление этой функции в виде $i_k = i_k(U_B - DU_K)$, когда i_k зависит не от каждого из напряжений U_B и U_K в отдельности, а от управляющего напряжения $U_{упр} = U_B - DU_K$. Параметр D , называемый проницаемостью, характеризует влияние коллекторного напряжения на выходной ток транзистора. С учетом сказанного выше

$$i_k = i_k(U_B - DU_K) = C \frac{dU_k}{dt} + \frac{U_k}{R} + \frac{1}{L} \int U_k dt. \quad (8)$$

В пренебрежении током базы напряжение $U_B = M(di_L/dt)$, а $U_K = L(di_L/dt)$. Отсюда следует, что $U_{упр} = U_B - DU_K = (M/L - D)U_K = \chi U_K$. Продифференцировав (8) по времени, получаем следующее нелинейное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 U_k}{dt^2} + \frac{d}{dt} \left[\frac{U_k}{CR} - \frac{1}{C} i_k(\chi U_k) \right] + \omega_0^2 U_k = 0. \quad (9)$$

Для его решения необходимо знать конкретную зависимость $i_k(\chi U_k)$, которая выше описана степенным полиномом (2). При отсутствии внешних возмущений колебания в генераторе возникнут, когда будут выполнены условия его самовозбуждения. В этом случае выходное напряжение сначала будет нарастать со временем, а затем выйдет на стационарный уровень с постоянной амплитудой $U_{ст}$.

(рис. 13). Найдем а) условия возникновения колебаний в автогенераторе и б) стационарную амплитуду автоколебаний.

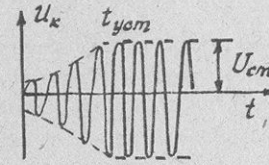


Рис. 13

Рассмотрим начальную стадию процесса генерации для времен много меньших времени установления колебаний $t_{уст}$. В этом случае уровень колебаний незначителен и транзистор находится в линейном режиме. В разложении $i_k = i_k(\chi U_k)$ по степеням χU_k отличным от нуля будет лишь коэффициент $\beta_1 = S_0$, остальные $\beta_n = 0$ ($n > 2$).

Тогда вместо уравнения (9) получаем линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^2 U_k}{dt^2} + 2\alpha \frac{dU_k}{dt} + \omega_0^2 U_k = 0, \quad (10)$$

в котором

$$2\alpha = \frac{1}{L} \left(r + \frac{\rho^2}{r_k^*} - \frac{S_0 M}{C} \right), \quad (11)$$

$r = \rho^2/R$ - собственное активное сопротивление колебательного контура, $\rho^2/r_k^* = r_{\beta H}$ - внесенное в контур сопротивление за счет шунтирующего действия на него внутреннего сопротивления транзистора r_k^* ; $-S_0 M/C = r_c$ - добавочное сопротивление, вносимое в контур за счет обратной связи.

Общее решение уравнения (10)

$$U_k = A_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega_{сб} t + \varphi_0),$$

где A_0 и φ_0 - постоянные, зависящие от начальных условий, $\omega_{сб} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ - частота колебаний. Так как добротность $Q \gg 1$, то $\alpha^2 \ll \omega_0^2$ и $\omega_{сб} \approx \omega_0$.

Амплитуда колебаний со временем будет расти, если $\alpha < 0$

или

$$\frac{S_0 M}{rC} > 1 + \frac{\rho^2}{r \cdot r_k^*} = 1 + \frac{R}{r_k^*}. \quad (12)$$

Выполнение неравенства (12) означает, что автогенератор является неустойчивой системой. По этому признаку (12) есть условие самовозбуждения. Оно будет выполнено, если

1) обратная связь положительна - коэффициент взаимной индукции M имеет такой знак, что сдвиг фазы между напряжениями коллектор-эмиттер и база-эмиттер равен 180° ($r_2 < 0$);

2) обратная связь достаточно глубокая - энергия, вносимая в контур, превышает энергию потерь ($|K_1| > r + r_{\beta H}$). Частота генерации $\omega_r \approx \omega_0$.

Если сопротивление коллекторного перехода $r_k^* \gg R$ - резонансного сопротивления, то условие самовозбуждения будет иметь более простой вид:

$$S_0 M / r C > 1. \quad (13)$$

Перепишем левую часть (13) в ином виде:

$$\frac{S_0 M}{r C} = S_0 \frac{1}{r} \left(\frac{L}{C} \right) \left(\frac{M}{L} \right) = (S_0 R) \cdot n = K_1 K_2,$$

где K_1 - коэффициент усиления резонансного усилителя; $n = K_2$ - коэффициент передачи трансформатора $L = L_{cb}$.

Очевидно, что (13) совпадает с условием (1).

Нарастание колебаний происходит за время $t_{уст} \gg 2\pi/\omega_0$.

Поэтому генерируемое напряжение почти синусоидально в каждый из текущих моментов времени t от начала генерации до ее установления, т.к. амплитуда и фаза колебаний являются медленными функциями времени. С учетом зависимости параметров транзистора от амплитуды в соответствии с квазилинейным методом S_0 нужно заметить на S_{cp} , а r_k^* на R_i' . Тогда вместо (9) будем иметь уравнение

$$\frac{d^2 u_k}{dt^2} - 2\alpha_{cp} \frac{du_k}{dt} + \omega_0^2 u_k = 0, \quad (14)$$

где

$$2\alpha_{cp} = \frac{1}{L} \left(r + \frac{\rho^2}{R_i'} - \frac{S_{cp} M}{C} \right). \quad (15)$$

В стационарном режиме $U_k = const$.

Следовательно, постоянны и R_i' и S_{cp} . Форма напряжения на кон-

туре синусоидальна, что можно представить как результат решения уравнения для гармонического осциллятора

$$\frac{d^2 u_k}{dt^2} + \omega_0^2 u_k = 0. \quad (16)$$

Уравнение (14) переходит в (16), если $\alpha_{cp} = 0$, или

$$\frac{S_{cp} M}{r C} = 1 + \frac{R}{R_i'}$$

Полученное равенство определяет амплитуду стационарных колебаний и называется условием баланса амплитуд. Смысл его в том, что в стационарном режиме в контур энергия равна энергии потерь. Вносимая энергия характеризуется средним добавочным сопротивлением $r_{cp} = -S_{cp} M / C$, а энергия потерь - суммой $r + r_{\beta H} = r + \rho^2 / R_i'$. В установившемся режиме $|K_{cp}| = r + r_{\beta H}$.

Если реакция коллекторного напряжения незначительна $R_i' \gg R$, то условием баланса амплитуд будет

$$S_{cp} M / C r = 1. \quad (17)$$

Отметим, что поскольку величина $S_{cp} R$ является коэффициентом усиления по первой гармонике K_1 нелинейного резонансного усилителя, то (17) можно записать в виде

$$K_1 K_2 = 1,$$

что совпадает с (7).

Из соотношения (17), используя экспериментальную зависимость S_{cp} от амплитуды колебания на базе транзистора (см. рис.5), можно найти стационарную амплитуду этого колебания.

Значение стационарной амплитуды колебаний можно найти и с помощью колебательной характеристики. Действительно, с учетом (4) условие $K_1 K_2 = 1$ равносильно соотношению

$$\frac{I_1(U_\beta)}{U_\beta} \cdot R K_2 = 1$$

или

$$I_1(U_\beta) = U_\beta \frac{1}{R K_2}. \quad (18)$$

Используя экспериментальные зависимости (рис.6) и графически отыскивая решение уравнения (18) относительно U_β , получим искомое значение стационарной амплитуды.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Обычно автогенератор питает не от двух источников, как это изображено на рис. 2, а от одного. Поэтому экспериментально в данной лабораторной работе будет исследоваться генератор, выполненный по схеме, изображенной на рис. 14. В качестве уси- тельного элемента используется кремниевый *n-p-n* транзистор КТ306 Б. Его начальный ре- жим по постоянному току обеспе- чивается резисторами R_3 , R_1 и R_2 . Напряжение, сни- жаемое с R_1 может плавно из- меняться, что позволяет изменять начальное напряжение смещения на базе $E_{см}$ (по отношению к эмиттеру). Емкость $C_{бл}$ - блокировоч- ная и служит для того, чтобы отфильтровать переменную составляющую напряжения, снимаемого с потенциометра R_1 . Сопротивление R_3 - элемент термостабилизации начальной рабочей точки. Емкость C_3 отфильтровывает переменную составляющую напряжения на R_3 , если $1/\omega_0 C_3 \ll R_3$, и обеспечивает таким образом "заземление" эмиттера по переменному току. В результате транзистор оказывается включенным по схеме с общим эмиттером.

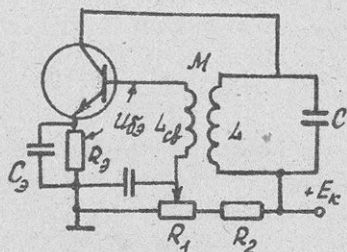


Рис. 14

Помимо этого цепочка $R_3 C_3$ используется для получения до- полнительного напряжения смещения, зависящего от уровня генериру- емых колебаний. В начальной стадии генерации, когда транзистор еще не вошел в нелинейный режим работы $t \ll t_{уст}$ смещение на ба- зе $E_{см}$ будет определяться положением движка потенциометра R_1 . По мере роста колебаний ток эмиттера приобретает форму импульсов с углом отсечки θ , зависящим от уровня напряжения $U_б$. Причем импульсы тока эмиттера при попадании транзистора в режим насыщения не будут иметь провалов, характерных для тока коллекто- ра. Это связано с тем, что прямое (отпирающее) напряжение на ко- ллекторном переходе уменьшает лишь ток коллектора, в то время как эмиттерный переход как был так и остается в режиме инжекции носителей. Поэтому мы можем считать, что ток эмиттера в стацио- нарном режиме имеет форму импульсов, изображенных на рис. 15 с углом отсечки θ . Его постоянная составляющая равна I_{30} .

Протекая через сопротивление R_3 она создает на нем дополнитель- ное падение напряжения:

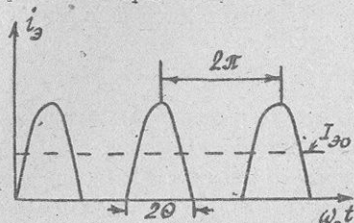


Рис. 15

$U_{гон} = I_{30} R_3$, величина которого зависит от амплитуды напряжения на базе $U_б$. Чем больше $U_б$, тем больше величина I_{30} и тем больше значение $U_{гон}$. Емкость C_3 от- фильтровывает переменную составля- ющую, т.к. ее импеданс $1/\omega_0 C_3 \ll R_3$.

Результирующее постоянное напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ} = E_{см} - U_{гон}$, где $E_{см}$ - начальное напряжение сме- щения между базой и эмиттером, задаваемое с помощью делителя $R_1 \div R_2$.

Таким образом, рабочая точка транзистора будет сме- щаться в сторону меньших напряжений на базе, т.е. в область мень- ших углов отсечки. Это, во-первых, дает возможность работать тран- зистору в более выгодном энергетическом режиме, т.к. уменьшается постоянная составляющая тока коллектора и, следовательно, мощность источника питания, рассеиваемая на коллекторном переходе.

Во-вторых, уменьшается влияние транзистора на колебательный контур и тем самым повышается стабильность частоты автогенератора.

ЗАДАНИЕ

- I. Ознакомиться со схемой лабораторного макета генератора (см. Приложение) и измерительными приборами.
- II. Измерить частоту генерируемых колебаний для чего
 - 1) переключатель "генератор-усилитель" поставить в положение "генератор";
 - 2) включить емкость в цепи эмиттера;
 - 3) при минимальной связи установить на переходе база-эмиттер транзистора максимальное напряжение смещения $E_{см} = 0,7$ В. Отсчет $E_{см}$ производится по стрелочному индикатору на передней панели макета. Напряжение источника питания на коллекторе $E_k = 9$ В и в процессе ее выполнения работы не изменяется;
 - 4) увеличивая связь, добиться возбуждения генератора. Наличие автоколебаний регистрируется с помощью осциллографа и вольтметра, подключаемых соответственно к гнездам Γ_1 и Γ_2 ;

б) отключив осциллограф, подключить к гнезду Г₄ частотомер и измерить частоту автоколебаний при двух значениях емкости контура.

Отключить дополнительную емкость от контура генератора.

III. Снять зависимость амплитуды выходного напряжения от величины обратной связи для двух значений напряжения смещения $E_{см1}$ и $E_{см2}$; $E_{см1}$ соответствует положению начальной рабочей точки на участке с максимальной крутизной, а $E_{см2}$ - вблизи напряжения отсечки.

1) Напряжение смещения максимальное

а) К гнезду Г₂ подключить вольтметр, а к гнезду Г₃ - осциллограф.

б) Установить максимальное напряжение $E_{см}$.

в) Увеличивая и уменьшая коэффициент взаимной индукции и между индуктивностью контура и индуктивностью связи, снять зависимости амплитуды напряжения на контуре $U_k = U_k(M)$ и постоянного напряжения между базой и эмиттером

$$U_{бэ} = U_{бэ}(M) \text{ от величины } M.$$

г) Зафиксировать характерные осциллограммы импульсов тока коллектора с указанием соответствующих им величин M .

д) Повторить эти измерения при отключенной емкости в цепи эмиттера.

2) Напряжение смещения $E_{см} = 0$

а) Установить напряжение $E_{см} = 0$.

б) Установить максимальную обратную связь.

в) Включить емкость в цепи эмиттера.

г) Плавно увеличивая $E_{см}$, добиться возбуждения генератора. Изменяя связь, убедиться в наличии гистерезисной петли в зависимости $U_k = U_k(M)$.

д) Уменьшая и увеличивая M , снять зависимости и $U_{бэ} = U_{бэ}(M)$.

е) Характерные осциллограммы импульсов тока зарисовать с указанием значений M , при которых они получены.

IV. Снять колебательные характеристики при напряжениях смещения, равных $E_{см1}$ и $E_{см2}$.

1) Начальное смещение $E_{см1}$

а) Включить емкость в цепи эмиттера.

б) Переключатель "генератор-усилитель" поставить в положение "усилитель".

в) К гнезду Г₁ подключить внешний генератор синусоидальных колебаний.

г) Частоту внешнего генератора подобрать такой, чтобы контур был настроен в резонанс. Для этого установить $U_{кк} \approx 0,05$ В. Изменяя частоту внешнего генератора добиться максимального отклонения стрелки вольтметра и максимальной амплитуды изображения на экране осциллографа, подключенного к гнезду Г₄.

д) Изменяя $U_{кк}$ от 0,01 В до 0,3 В, снять зависимости $U_k = U_k(U_{кк})$ и $U_{бэ} = U_{бэ}(U_{кк})$. С помощью подключенного к гнезду Г₃ осциллографа зафиксировать характерные осциллограммы тока коллектора и изменения в его форме с указанием соответствующих им значений напряжения $U_{кк}$.

Для исключения погрешностей рекомендуется проводить измерения при одном положении переключателя уровня выходного сигнала внешнего генератора - 0,3 В.

2) Начальное смещение $E_{см2}$

а) Не изменяя частоты внешнего генератора, установить

$$E_{см} = E_{см2} \text{ . Для этого}$$

- переключатель "усилитель-генератор" установить в положение "генератор";

- выполнить пункты а - г раздела 2 задания III при включенной емкости C_3 ;

- установить переключатель "усилитель-генератор" вновь в положение "усилитель".

б) Изменяя $U_{кк}$ от 0,01 В до 0,3 В, снять зависимости

$$U_k = U_k(U_{кк}) \text{ и } U_{бэ} = U_{бэ}(U_{кк}) \text{ . Зафиксировать}$$

характерные осциллограммы тока коллектора.

У. Снять зависимость напряжения на контуре от частоты подаваемого на усилитель напряжения

1) $E_{см} = E_{см2}$

2) Переключатель "усилитель-генератор" - в положении "усилитель".

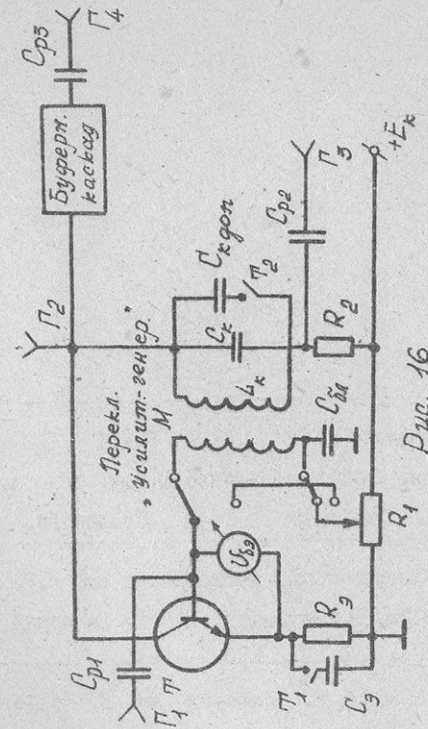
3) Изменяя частоту входного напряжения f в пределах от

20 КГц до значения f , несколько превышающего частоту генерации, измерить зависимость $U_k = U_k(f)$.

4) Форму колебаний на выходе наблюдать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду Г₄.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- I. Дать определения следующим понятиям:
 - комплексный коэффициент передачи линейного четырехполюсника;
 - амплитудно-частотная и фазо-частотные характеристики четырехполюсника;
 - крутизна вольт-амперной характеристики транзистора;
 - средняя крутизна резонансного усилительного каскада;
 - колебательная характеристика такого каскада.
2. Как зависит средняя крутизна от смещения и от амплитуды входного синусоидального колебания?
3. Как изменяется вид колебательной характеристики при изменении смещения?
4. Как измерить колебательную характеристику?
5. В чем заключаются условия самовозбуждения автогенератора?
6. Чем определяется амплитуда стационарных колебаний автогенератора?
7. При каких условиях колебания автогенератора приобретают стационарный характер?
8. Какова форма коллекторного тока в стационарном режиме автогенератора?
9. В чем заключается условие стационарности автогенератора?
10. Может ли быть стационарное состояние автогенератора неустойчивым?
- II. Объяснить суть различия между мягким и жестким возбуждением автогенератора.



ЛИТЕРАТУРА

1. БАСКАКОВ С.И. Радиотехнические цепи и сигналы.-М.:
Высшая школа, 1983.
2. ГОНОРОВСКИЙ И.С. Радиотехнические цепи и сигналы.-М.:
Сов.радио, 1986.
3. Основы теории колебаний. Под ред. Мигулина В.В.-М.:
Наука, 1976.

Подписано к печати 06.06.94г. Формат 60x84 ¹/₁₆.

Печать офсетная. Бумага оберточная. Усл. печ. л. 1,5

Тираж 300 экз. Заказ 963. Бесплатно.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

603600 ГСП-20, Н. Новгород, просп. Гагарина, 23.

Типография ННГУ. 603000, Н. Новгород, ул. Б. Покровская, 37.
