

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

- 3 -

#### 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 четырехполюсник в прямой цепи, соответствующий резонансному усилителю, и четырехполюсник в обратной цепи. (Обратите внимание на взаимное расположение входов и выходов четырехполюсников).

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 четырехполюсник обратной связи.

При изучении автогенератора первостепенное значение имеют два вопроса:

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

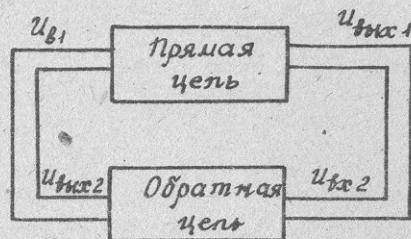


Рис. 1

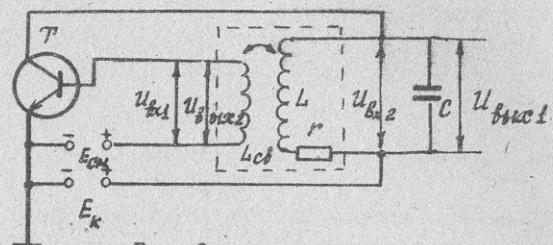


Рис. 2

#### 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. Скачок 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  $\dot{K}_1(\omega)$  и  $\dot{K}_2(\omega)$  комплексные коэффициенты передачи четырехполюсников прямой и обратной цепи соответственно

$$\dot{K}_1(\omega) = \frac{\dot{U}_{bx1}}{\dot{U}_{bx1}},$$

$$\dot{K}_2(\omega) = \frac{\dot{U}_{bx2}}{\dot{U}_{bx2}},$$

где  $\dot{U}$  — комплексная амплитуда колебания.

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

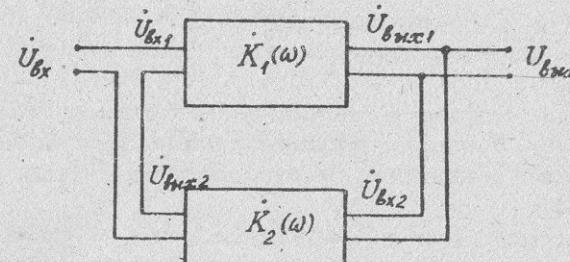


Рис. 3

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

$$K(\omega) = \dot{U}_{bx2} / \dot{U}_{bx}.$$

Поскольку

$$\dot{U}_{bx2} = \dot{U}_{bx1} = \dot{U}_{bx} \cdot \dot{K}(\omega) =$$

$$= [\dot{U}_{tx} + \dot{K}_2(\omega) \dot{U}_{tx}] \dot{K}_1(\omega).$$

$$\text{то } \dot{K}(\omega) = \frac{\dot{K}_1(\omega)}{1 - \dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega)}.$$

Наличие особой точки у комплексной функции  $\dot{K}(\omega)$  при условии  
 $1 - \dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega) = 0$

физически можно интерпретировать следующим образом: схема рис.3 при выполнении условия  $1 - \dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega) = 0$  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

$$1 - \dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega) = 0.$$

Отсюда

$$|\dot{K}_1(\omega)| \cdot |\dot{K}_2(\omega)| = 1, \quad \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n, \quad (I)$$

где  $\varphi_1(\omega) = \varphi_2(\omega)$  — аргументы функций  $\dot{K}_1(\omega)$  и  $\dot{K}_2(\omega)$ ,  $n$  — целое число. Первое условие получило название "баланс амплитуд", второе — "баланс фаз".

Равенства (I) можно рассматривать как уравнения относительно переменной  $\omega$ . 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  $\omega^*$  модуль комплексного коэффициента передачи разомкнутого кольца обратной связи  $|\dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega)|$  равен 1, а суммарный набег фаз при прохождении сигнала с этой частотой по тому же кольцу составляет  $2\pi n$ , то в схеме произойдет самовозбуждение. Частота генерируемых колебаний будет равна  $\omega^*$ .

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  $|\dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega)| = 1$  не выполнено, имеем

$$1) |\dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega)| = 0 \quad \text{при } \dot{K}_2(\omega) = 0$$

— резонансный усилитель;

$$2) |\dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega)| < 1 \quad \text{при } \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n$$

— регенеративный усилитель;

$$3) |\dot{K}_1(\omega) \dot{K}_2(\omega)| > 1 \quad \text{при } \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n$$

— генератор нарастающих колебаний.

Рассмотрим каждый из этих случаев.

### I. Резонансный усилитель

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

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

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

где  $b_n$  — постоянные коэффициенты.

Подставив в (2) выражение для  $U_{tx}(t)$ , 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

$$I_1 = S_o U_0,$$

$S_o$  — крутизна в рабочей точке, для линейного усиления можно записать

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

$S_{cp}(U_c)$  — средняя крутизна, которая находится из (3) в соответствии с определением

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

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

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

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

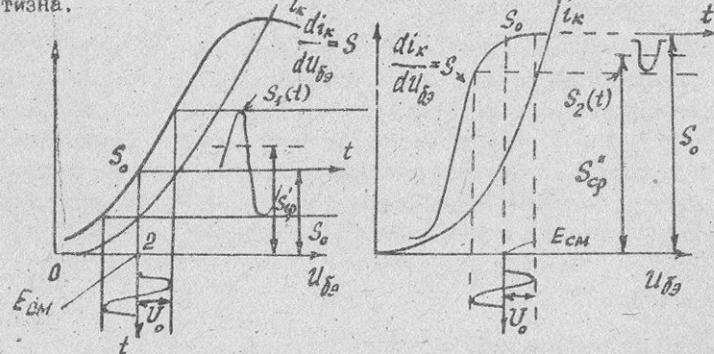


Рис. 4а

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  $U_o$  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  $U_o$ . Нетрудно заметить, что при увеличении амплитуды входного колебания в случае рис. 4а  $S_{cp}(U)$  будет возрастать, в случае рис. 4б - падать. На рис. 5 представлены два характерных вида зависимости  $S_{cp}(U_o)$ , 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  $U_o$ , 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  $U_k = f(U_o)$ .

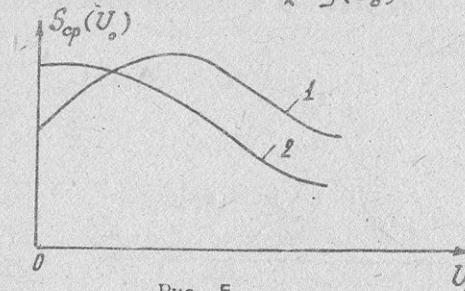


Рис. 5

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

$$K(\omega_o) = U_{k_{av}} / U_{o_{av}} = U_k / U_{o_{av}} = f(U_o). \quad (6)$$

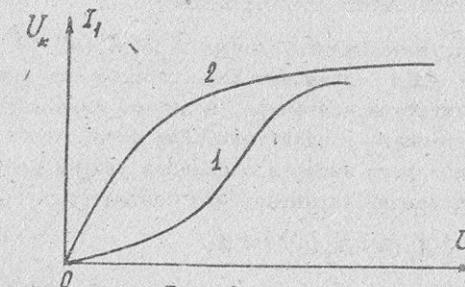


Рис. 6

## 2. Регенеративный усилитель

При положительной обратной связи в усилителе, т.е. при  $\Phi_1(\omega_o) + \Phi_2(\omega_o) = 2\pi n$ , при  $0 < |K_1(\omega_o)K_2(\omega_o)| < 1$  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 изби-

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

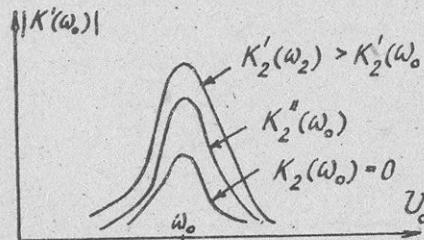


Рис. 7

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  $\dot{K}_1(\omega)\dot{K}_2(\omega) = 1$ , 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

$$|\dot{K}_1(\omega)\dot{K}_2(\omega)| > 1.$$

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).

$$U_{\text{вых}1} = K_1(\omega_0) U_{\text{вых}2}$$

- колебательная характеристика, (кривая I),

$$U_{\text{вых}2} = \frac{1}{K_2(\omega_0)} U_{\text{вых}1}$$

или

$$U_{\text{вых}1} = \frac{1}{K_2(\omega_0)} U_{\text{вых}2}$$

- прямая обратной связи (кривая 2).

Точка пересечения кривых I 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.

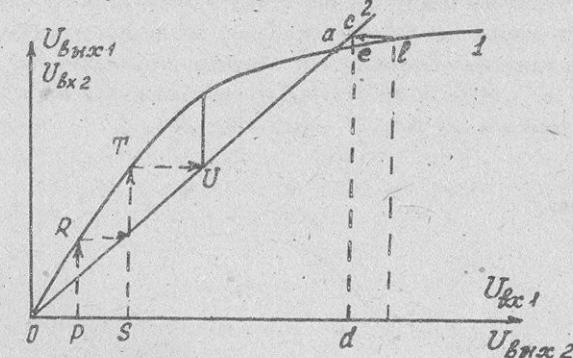


Рис. 8

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

Пусть схема находится в т.  $O$ . Если флуктуация приведет к амплитуде  $P$  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  $K_2(\omega_o)$  представленной на рис. 10 для мягкого режима и на рис. II – для жесткого.

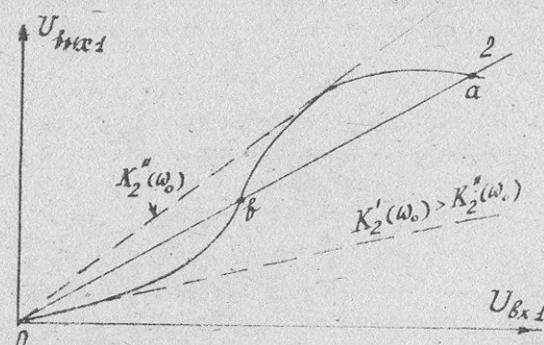


Рис. 9

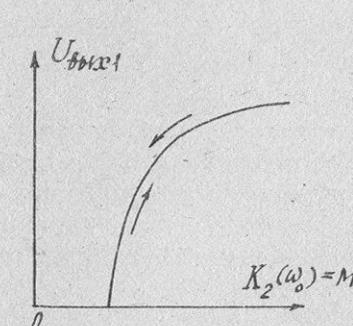


Рис. 10

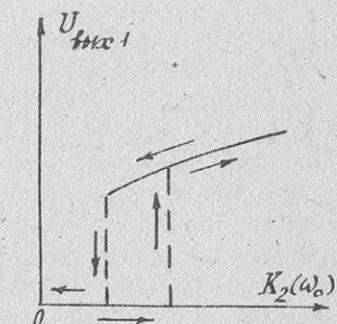


Рис. II

Наличие петли гистерезиса на рис. II 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  $K_2'(\omega_o)$ , а срываются при  $K_2''(\omega_o) < K_2'(\omega_o)$ .

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

#### Анализ схемы автогенератора

Существует множество различных вариантов технической реализации автогенератора.

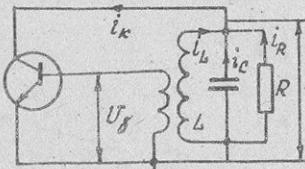
Простейшая схема автогенератора с индуктивной обратной связью, где в качестве усиительного элемента использован транзистор, приведена на рис. 2. Здесь избирательность по частоте обеспечивается параллельным колебательным контуром, включенным в коллекторную цепь транзистора  $T$ .

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

- 14 -  
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



$$i_k = i_c + i_L + i_R, \text{ где } i_c = C(dU_k/dt); i_L = \frac{1}{L} \int U_k dt;$$

$i_R = U_k/R$  - соответственно ток через емкость, сопротивление и индуктивность колебательного контура.

Рис. 12

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  $i_k(t) = i_k(U_B(t), U_k(t))$ . Приемлемой аппроксимацией является представление этой функции в виде  $i_k = i_k(U_B - D U_k)$ , когда  $i_k$  зависит не от каждого из напряжений  $U_B$  и  $U_k$  в отдельности, а от управляющего напряжения  $U_{УПР} = U_B - D U_k$ . Параметр  $D$ , называемый проницаемостью, характеризует влияние коллекторного напряжения на выходной ток транзистора. С учетом сказанного выше

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

В пренебрежении током базы напряжение  $U_B = M(di_L/dt)$ , а  $U_k = L(di_L/dt)$ . Отсюда следует, что  $U_{УПР} = U_B - D U_k = -(M/L - D) U_k = \chi U_k$ . 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  $U_{ст}$

- 15 -

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

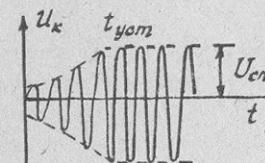


Рис. 13

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  $\chi U_k$  отличным от нуля будет лишь коэффициент  $b_1 = S_0$ , остальные  $b_n = 0$  ( $n \geq 2$ ).

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

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

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

Общее решение уравнения (10)

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

где  $A_0$  и  $\varphi_0$  - постоянные, зависящие от начальных условий,  $\omega_{cf} = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$  - частота колебаний. Так как добротность  $Q \gg 1$ , то  $\alpha^2 \ll \omega_0^2$  и  $\omega_{cf} \approx \omega_0$ .

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

или

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

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 взаимоиндукции  $M$  имеет такой знак, что сдвиг фазы между напряжениями коллектор-эмиттер и база-эмиттер равен  $180^\circ$  ( $\nu_- < 0$ );

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

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

$$\frac{S_o M}{r C} > 1. \quad (13)$$

Перепишем левую часть (13) в ином виде:

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

где  $K_1$  - коэффициент усиления резонансного усилителя;  $n = K_2$  - коэффициент передачи трансформатора  $L : L_{C\delta}$ .

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

Нарастание колебаний происходит за время  $t_{\text{раст}} \gg 2\pi/\omega_o$ . 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  $S_o$  нужно заменить на  $S_{cp}$ , а  $r_k''$  на  $R_i'$ . Тогда вместо (9) будем иметь уравнение

$$\frac{d^2 U_k}{dt^2} - 2\alpha_{cp} \frac{dU_k}{dt} + \omega_o^2 U_k = 0, \quad (14)$$

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  $U_k = \text{const}$ .

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

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

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

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

$$\frac{S_{cp} M}{r C} = 1 + \frac{R}{R_i'}. \quad (17)$$

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

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

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

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  $K_1 K_2 = 1$  разносильно соотношению

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

или

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

Используя экспериментальные зависимости (рис. 6) и графически отыскавшая решение уравнения (18) относительно  $U_\delta$ , получим искомое значение стационарной амплитуды.

### ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО МАКЕТА

Обычно автогенератор питают 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. I4. В качестве усиительного элемента используется кремниевый *n-p-n* транзистор КТ306 Б. Его начальный режим по постоянному току обеспечивается резисторами  $R_3$ ,  $R_1$  и  $R_2$ . Напряжение, снимаемое с  $R_1$  может плавно изменяться, что позволяет изменять начальное напряжение смещения на базе  $E_{CM}$  (по отношению к эмиттеру). Емкость  $C_{B1}$  — блокировочная и служит для того, чтобы отфильтровать переменную составляющую напряжения, снимаемого с потенциометра  $R_1$ . Сопротивление  $R_3$  — элемент терmostабилизации 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.

Помимо этого цепочка  $R_3 C_3$  используется для получения дополнительного напряжения смещения, зависящего от уровня генерируемых колебаний. В начальной стадии генерации, когда транзистор еще не вошел в нелинейный режим работы  $t \ll t_{yel}$  смещение на базе  $E_{CM}$  будет определяться положением движка потенциометра  $R_1$ . По мере роста колебаний ток эмиттера приобретает форму импульсов с углом отсечки  $\Theta$ , зависящим от уровня напряжения  $U_f$ . Причем импульсы тока эмиттера при попадании транзистора в режим насыщения не будут иметь провалов, характерных для тока коллектора. Это связано с тем, что прямое (отпирающее) напряжение на коллекторном переходе уменьшает лишь ток коллектора, в то время как эмиттерный переход как был так и остается в режиме инъекции носителей. Поэтому мы можем считать, что ток эмиттера в стационарном режиме имеет форму импульсов, изображенных на рис. I5 с углом отсечки  $\Theta$ . Его постоянная составляющая равна  $I_{30}$ .

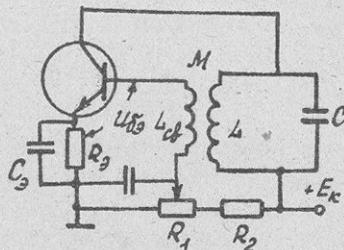


Рис. I4

Протекая через сопротивление  $R_3$  она создает на нем дополнительное падение напряжения:

$U_{gon} = I_{30} R_3$ , величина которого зависит от амплитуды напряжения на базе  $U_f$ . Чем больше  $U_f$ , тем больше величина  $I_{30}$  и тем больше значение  $U_{gon}$ . Емкость  $C_3$  отфильтровывает переменную составляющую, т.к. ее импеданс  $1/\omega_0 C_3 \ll R_3$ .

Результирующее постоянное напряжение между базой и эмиттером  $U_{b3} = E_{CM} - U_{gon}$ , где  $E_{CM}$  — начальное напряжение смещения между базой и эмиттером, задаваемое с помощью делителя

$R_1 + R_2$ . Таким образом, рабочая точка транзистора будет смещающаяся в сторону меньших напряжений на базе, т.е. в область меньших углов отсечки. Это, во-первых, дает возможность работать транзистору 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 цепь эмиттера;
- 3) при минимальной связи установить на переходе база-эмиттер транзистора максимальное напряжение смещения  $E_{CM} = 0,7$  В. Отсчет  $E_{CM}$  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  $\Gamma_4$  и  $\Gamma_2$ :

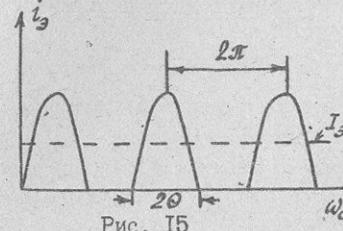


Рис. I5

- 5) отключив осциллограф, подключить к гнезду  $\Gamma_4$  частотомер и измерить частоту автоколебаний при двух значениях ёмкости контура.

Отключить дополнительную ёмкость от контура генератора.

III. Снять зависимость амплитуды выходного напряжения от величины обратной связи для двух значений напряжения смещения  $E_{CM1}$  и  $E_{CM2}$ :  $E_{CM1}$  соответствует положению начальной рабочей точки на участке с максимальной крутизной, а  $E_{CM2}$  - вблизи напряжения отсечки.

1) Напряжение смещения максимальное

- а) К гнезду  $\Gamma_2$  подключить вольтметр, а к гнезду  $\Gamma_3$  - осциллограф.

- б) Установить максимальное напряжение  $E_{CM}$ .

- в) Увеличивая и уменьшая коэффициент взаимоиндукции 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  $U_{\delta_3} = U_{\delta_3}(M)$  от величин  $M$ .

- г) Задокументировать характерные осцилограммы импульсов тока коллектора с указанием соответствующих им величин  $M$ .

- д) Повторить эти измерения при отключенной ёмкости в цепи эмиттера.

2) Напряжение смещения  $E_{CM} = 0$

- а) Установить напряжение  $E_{CM} = 0$ .

- б) Установить максимальную обратную связь.

- в) Включить ёмкость в цепь эмиттера.

- г) Плавно увеличивая  $E_{CM}$ , 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  $U_{\delta_3} = U_{\delta_3}(M)$ .

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

IV. Снять колебательные характеристики при напряжениях смещениях  $E_{CM1}$  и  $E_{CM2}$ .

1) Начальное смещение  $E_{CM1}$ .

- а) Включить ёмкость в цепь эмиттера.

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

- в) К гнезду  $\Gamma_1$  подключить внешний генератор синусоидальных колебаний.

- г) Частоту внешнего генератора подобрать такой, чтобы контур был настроен в резонанс. Для этого установить

$U_{fx} \approx 0,05$  В. Изменяя частоту внешнего генератора добиться максимального отклонения стрелки вольтметра и максимальной амплитуды изображения на экране осциллографа, подключенного к гнезду  $\Gamma_4$ .

- д) Изменяя  $U_{fx}$  от 0,01 В до 0,3 В, снять зависимости  $U_k = U_k(U_{fx})$  и  $U_{\delta_3} = U_{\delta_3}(U_{fx})$ . С помощью подключенного к гнезду  $\Gamma_3$  осциллографа зафиксировать характерные осцилограммы тока коллектора и изменения в его форме с указанием соответствующих им значений напряжения  $U_{fx}$ .

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

2) Начальное смещение  $E_{CM2}$

- а) Не изменяя частоты внешнего генератора, установить

$E_{CM} = E_{CM2}$ . Для этого  
- переключатель "усилитель-генератор" установить в положение "генератор";  
- выполнить пункты а - г раздела 2 задания III при включенной ёмкости  $C_3$ ;  
- установить переключатель "усилитель-генератор" вновь в положение "усилитель".

- б) Изменяя  $U_{fx}$  от 0,01 В до 0,3 В, снять зависимости  $U_k = U_k(U_{fx})$  и  $U_{\delta_3} = U_{\delta_3}(U_{fx})$ . Зафиксировать характерные осцилограммы тока коллектора.

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

1)  $E_{CM} = E_{CM2}$

- 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  $\Gamma_4$ .

#### 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 преобретают 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.

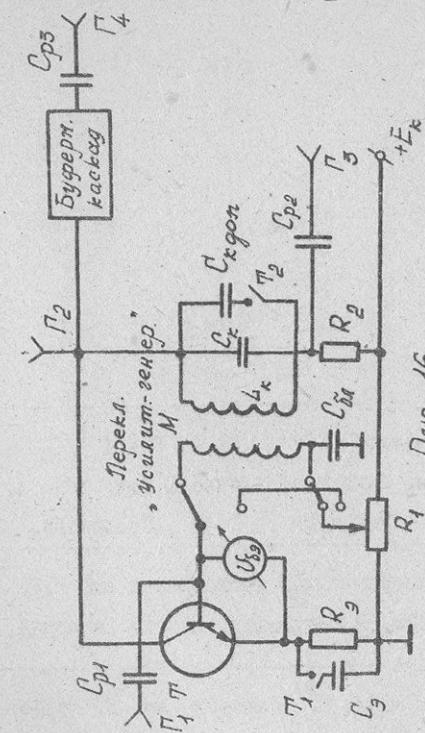


Рис. 16

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 I/16.

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

Тираж 300 экз. Заказ 963. Госплатно.

---

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

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

---

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