

НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н. И. ЛОБАЧЕВСКОГО
Радиофизический факультет

Отчет по лабораторной работе №1
Генератор гармонических колебаний

Выполнили студенты 430 группы
Войтович Д.А., Карусевич А.А., Разова А.А.

Нижний Новгород, 2018

1. Цель работы

Ознакомление с устройством генератора гармонических колебаний.

2. Назначение автогенератора

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

3. 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.

4. 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

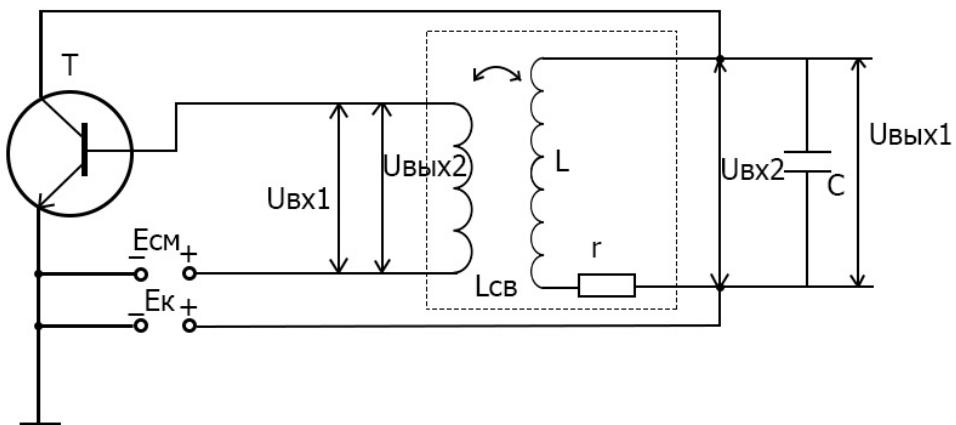


Рис. 2

5. 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 колеба-

ний 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 на рис.1. Обозначим через $\dot{K}_{1(\omega)}$ и $\dot{K}_{2(\omega)}$ комплексные коэффициенты передачи четырехполюсников прямой и обратной цепи соответственно

$$\dot{K}_1(\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вых}1}}{\dot{U}_{\text{вх}1}}$$

$$\dot{K}_2(\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вых}2}}{\dot{U}_{\text{вх}2}}$$

где \dot{U} - комплексная амплитуда.

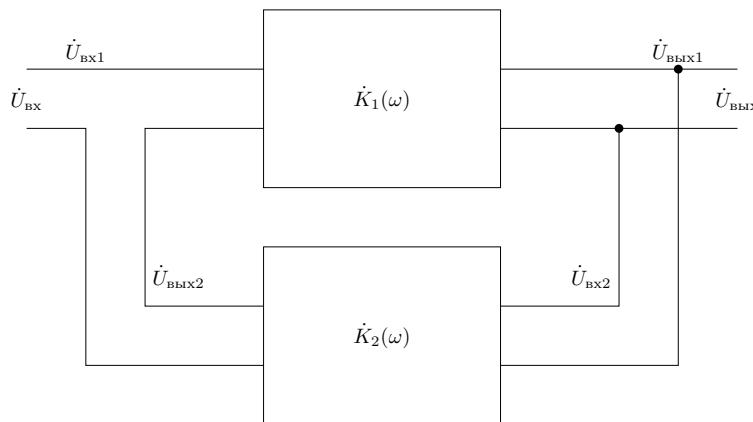


Рис. 3

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

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

$$\dot{K}(\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}}.$$

Поскольку

$$\begin{aligned}\dot{U}_{\text{вых}} &= \dot{U}_{\text{вых}1} = \dot{U}_{\text{вх}1}\dot{K}_1(\omega) = \\ &= [\dot{U}_{\text{вх}1} + \dot{K}_2(\omega)\dot{U}_{\text{вых}1}]\dot{K}_1(\omega),\end{aligned}$$

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 $1 - \dot{K}_1(\omega)\dot{K}_2(\omega)$ физически можно интерпретировать следующим образом: схема на рис.3 при выполнении условия $1 - \dot{K}_1(\omega)\dot{K}_2(\omega)$ выдает на выходе колебание с ненулевой амплитудой при бесконечно малой (нулевой) амплитуде колебания на входе. Следовательно, схема на рис.3 при названных условиях является автогенератором.

Условия самовозбуждения вытекают из равенства

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

Отсюда

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

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

Равенства (1) можно рассматривать как уравнения относительно переменной ω . Корни этих уравнений являются теми частотами, на которых возможно возбуждение. Частота генерации - корень системы уравнений (1).

Таким образом, если в схеме автогенератора на какой-либо частоте ω^* 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 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 $|\dot{K}_1(\omega)||\dot{K}_2(\omega)| = 1$ не выполнено, имеем

1. $|\dot{K}_1(\omega)||\dot{K}_2(\omega)| = 0$ при $\dot{K}_2(\omega) = 0$ - резонансный усилитель;
2. $|\dot{K}_1(\omega)||\dot{K}_2(\omega)| < 1$ при $\varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n$ - регенеративный усилитель;
3. $|\dot{K}_1(\omega)||\dot{K}_2(\omega)| > 1$ при $\varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n$ - генератор нарастающих колебаний.

Рассмотрим каждый из этих случаев.

5.1. Резонансный усилитель

При малом уровне входного сигнала усилитель работает в линейном режиме: $\dot{K}(\omega)$ является его исчерпывающей характеристикой. При возрастании амплитуды входного колебания $U_{\text{вх}}(t) = U_0 \cos \omega_0 t$ линейность усилителя будет нарушена. Аппроксимируя прямую динамическую характеристику транзистора $i_k = f(U_{\text{вх}})$ степенным полиномом

степени N , выходной ток усилительного каскада можно записать в виде

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

где b_n - постоянные коэффициенты. Подставив в (2) выражение для $U_{\text{вх}}(t)$, 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 усилителя можно записать

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

$S_{\text{cp}}(U_0)$ - средняя крутизна, которая находится из (3) в соответствии с определением $S_{\text{cp}}(U_0) = I_1/U_0$:

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

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

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

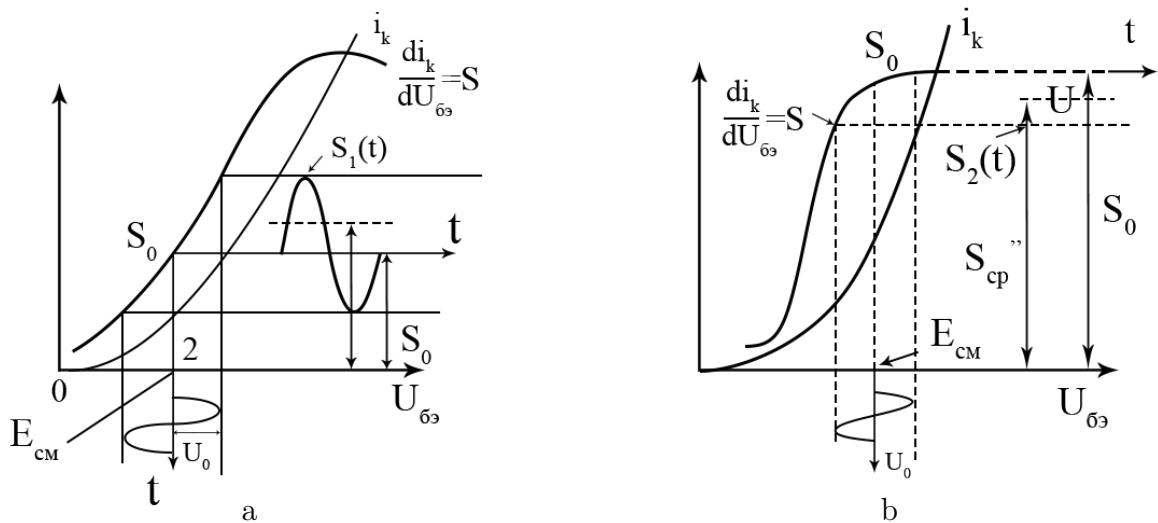


Рис. 4

Различие рисунков ??а и ??б состоит в том, что в первом случае с помощью смещения $E_{\text{см}}$ рабочая точка выбрана на нелинейном участке проходной характеристики, во втором случае - на линейном, где в окрестности рабочей точки $S \approx \text{const}$. 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 $S'_{\text{ср}}$ и $S''_{\text{ср}}$ являются значениями средней крутизны, соответствующими амплитуде U_0 . Нетрудно заметить, что при увеличении амплитуды входного колебания в случае рис.??а $S_{\text{ср}}(U_0)$ будет возрастать, в случае рис.??б - падать. На рис. 5 представлены два характерных вида зависимости $S_{\text{ср}}(U_0)$, при этом кривая 1 соответствует рис.??а, кривая 2 - рис.??б.

Зависимость (4) амплитуды первой гармоники выходного тока I_1 от амплитуды колебания на входе U_0 , получившая название "колебательной характеристики в соответствии с кривыми на рис.5 так же имеет два характерных вида. На рис.6 - кривая 1 и 2 соответствуют кривым 1 и 2 на рис.5. Поскольку при настройке контура усилителя на частоту усиливаемого сигнала фаза напряжения на контуре совпадает с фазой первой гармоники тока, то кривые на рис.6 отражают и характер зависимостей $U_k = f(U_0)$

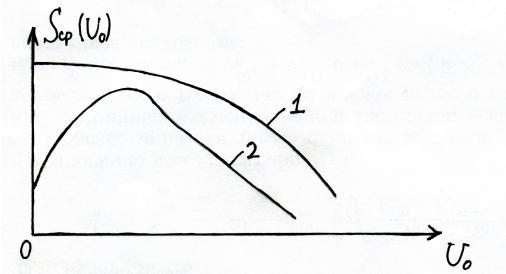


Рис. 5

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

$$\dot{K}(\omega) = \dot{U}_{\text{вых}}/\dot{U}_{\text{вх}} = U_k/U_{\text{вх}} = f(U_0). \quad (6)$$

5.2. Регенеративный усилитель

При положительной обратной связи в усилителе, т.е. при $\varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega) = 2\pi n$, при $0 < |\dot{K}_1(\omega)| |\dot{K}_2(\omega)| < 1$ автоколебания в схеме на 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

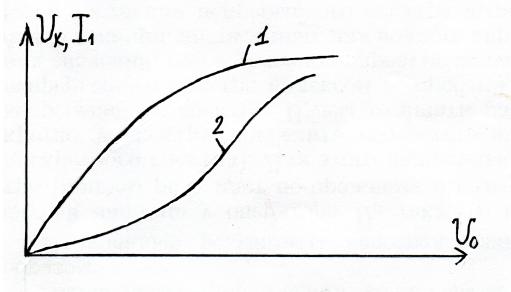


Рис. 6

его избирательность. Компенсация потерь увеличивает добротность контура. На рис.?? иллюстрируется влияние степени связи(т.е. величины $|\dot{K}_2(\omega)|$) на усиления и избирательность.

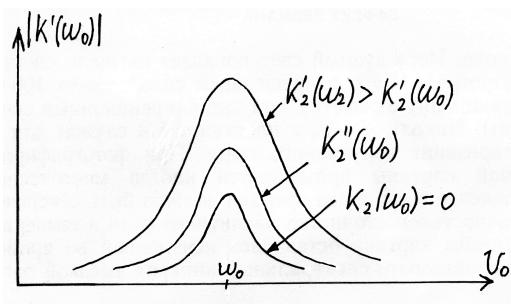


Рис. 7

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

5.3. Ограничение нарастающих колебаний. Стационарный режим генератора

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 на 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

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

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.рис2)

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

- колебательная характеристика (кривая 1)

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

или

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

- прямая обратной связи (кривая 2).

Точка пересечения кривых 1 и 2 (точка α) означает

$$K_1(\omega_0) = \frac{1}{K_2(\omega_0)}$$

или

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

т.е. соответствует стационарной амплитуде автоколебаний.

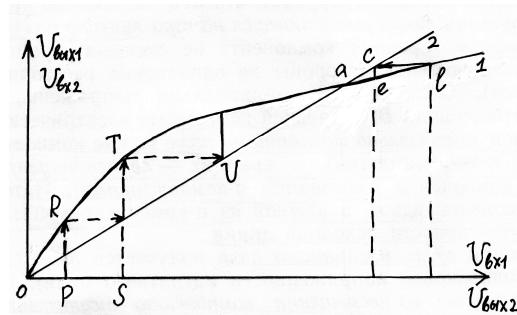


Рис. 8

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

Пусть схема находится в точке O . Если флуктуация приведет к амплитуде 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 точку T и т.д., пока схема не придет к точке α .

Проведем аналогичные рассуждения относительно состояния в точке α . Пусть флуктуация выведет амплитуду напряжения на контуре из точки α в точку 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 α , что и доказывает устойчивость этого состояния.

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

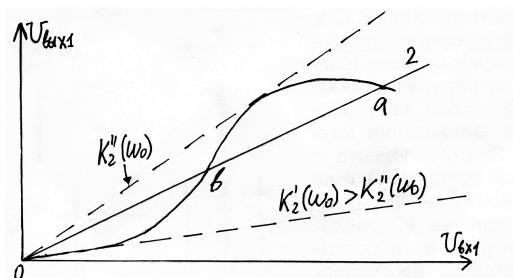


Рис. 9

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.?? для мягкого режима и на рис.?? - для жесткого.

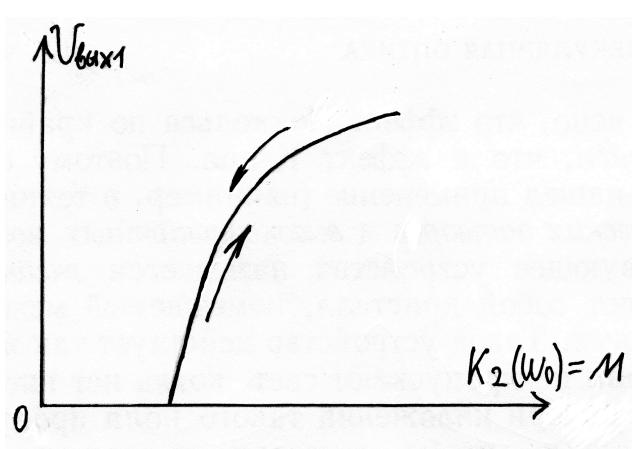


Рис. 10

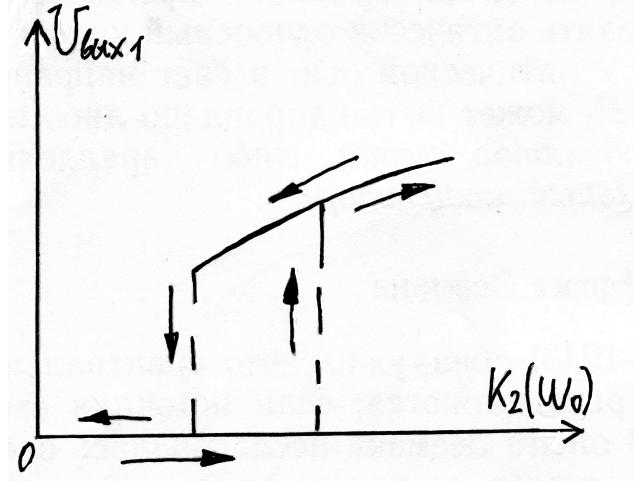


Рис. 11

Наличие петли гистерезиса на рис.?? 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).

6. Анализ схемы автогенератора

Существует множество различных вариантов технической реализации автогенератора.

Простейшая схема автогенератора с индуктивной обратной связью, где в качестве усиливательного 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.

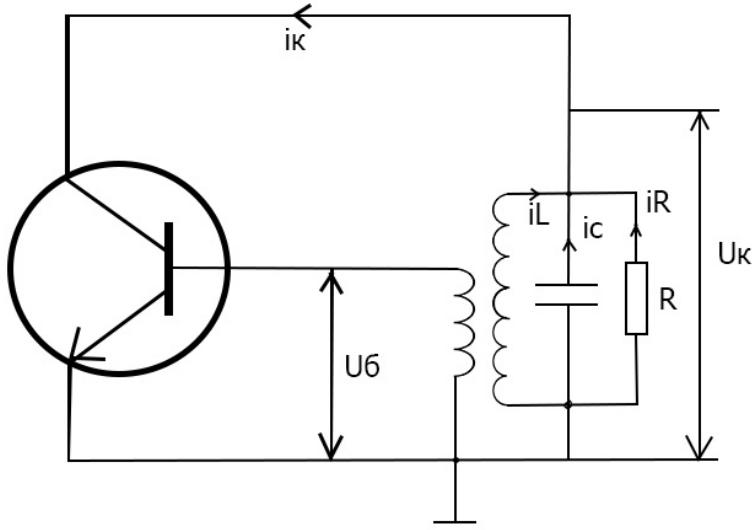


Рис. 12

Коллекtorный ток

$$i_k = i_C + i_R + i_L$$

$$i_C = C \frac{dU_k}{dt}$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int U_k dt$$

$$i_r = \frac{U_k}{R}$$

- 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_6 на коллекторе U_k транзистора можно представить в виде функции $i_k(t) = i_k(U_6(t), U_k(t))$. Приемлемой аппроксимацией является представление этой функции в виде $i_k = i_k(U_6 - DU_k)$, когда i_k зависит не от каждого из напряжений U_6 и U_k в отдельности, а от управляющего напряжения $U_{\text{упр}} = U_6 - DU_k$. Параметр D , называемый проницаемостью, характеризует влияние коллекторного напряжения на выходной ток транзистора. С учетом сказанного выше

$$i_k = i_k(U_6 - DU_k) = C \frac{dU_k}{dt} + \frac{U_k}{R} + \frac{1}{L} \int U_k dt \quad (8)$$

В пренебрежении током базы напряжение $U_b = \frac{d i_L}{dt}$, а $U_k = L \frac{d i_L}{dt}$. Отсюда следует, что $U_{\text{упр}} = U_b - D U_k = (M/L - D) U_k = \kappa U_k$. Продифференцировав (8) по времени, получаем следующее нелинейное дифференциальное уравнение

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

Для его решения необходимо знать конкретную зависимость $i_k(\kappa U_k)$, 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 $U_{\text{ст}}$ (рис.13). Найдем

1. условия возникновения колебаний в автогенераторе
2. стационарную амплитуду автоколебаний.

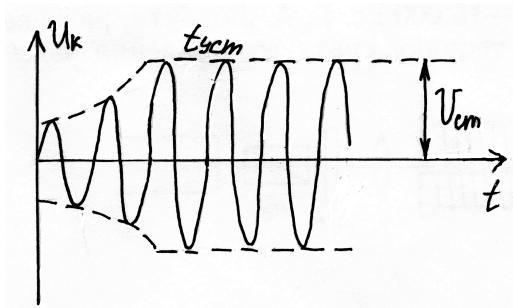


Рис. 13

Рассмотрим начальную стадию процесса генерации для времен много меньших времени установления колебаний $t_{\text{уст}}$. В этом случае уровень колебаний незначителен и транзистор находится в линейном режиме. В разложении $i_k = i_k(\kappa U_k)$ по степеням κU_k отличным от нуля будет лишь коэффициент $b_1 = S_0$, остальные $b_n = 0$ ($n \gg 2$).

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

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

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, $\rho^2/r_k^* = r_{\text{вн}}$ - 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)

$$U_k = A_0 \exp(-\alpha t) \cos(\omega_{cb} t + \varphi_0)$$

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

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 взаимоиндукции M имеет такой знак, что сдвиг фазы между напряжениями коллектор-эмиттер и база-эмиттер равен 180° ($r_- < 0$);
2. обратная связь достаточно глубокая - энергия, вносимая в контур, превышает энергию потерь ($|r_-| > r + r_{bh}$). Частота генерации $\omega_g \simeq \omega_0$

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

$$\frac{S_0 M}{rC} > 1 \quad (13)$$

Перепишем левую часть (13) в ином виде:

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

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

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

Нарастание колебаний происходит за время $t_{ust} \gg 2\pi/\omega_0$. 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 заменить на S_{cp} , а r_k^* на R'_i . Тогда вместо (9) будем иметь уравнение

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

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 $U_k = \text{const}$. Следовательно, постоянны и R'_i и S_{cp} . Форма напряжения на контуре синусоидальна, что можно представить как результат решения уравнения для гармонического осциллятора

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

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

$$\frac{S_{cp}M}{rC} = 1 + \frac{R}{R'_i}$$

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 $r + r_{bh1}^{cp} = r + \rho^2/R'_i$. В установившемся режиме $|r_-^{cp}| = r + r_{bh}^{cp}$.

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

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

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 $K_1 K_2 = 1$ равносильно соотношению

$$\frac{I_1(U_6)}{U_6} R K_2 = 1$$

или

$$I_1(U_6) = U_6 \frac{1}{R K_2} \quad (18)$$

Используя экспериментальные зависимости (см.рисб) и графически отыскивая решение уравнения (18) относительно U_6 , получим искомое значение стационарной амплитуды.

7. Описание лабораторного макета

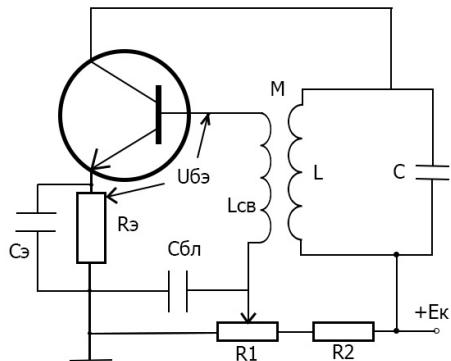


Рис. 14

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.14. В качестве усиительного элемента используется кремниевый $n-p-n$ транзистор КТ306 Б. Его начальный режим на 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 $C_{бл}$ - блокировочная 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.

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 $t \ll t_{уст}$, смещение на базе E_{cm} 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_b . 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 инжеекции носителей. Поэтому мы можем считать, что ток эмиттера в стационарном режиме имеет форму импульсов, изображенных на рис.15 с углом отсечки θ . Его постоянная составляющая равна I_{so} . Протекая через сопротивление R_3 она создает на нем дополнительное падение напряжения: $U_{доп} = I_{so} R_3$, величина которого зависит от амплитуды напряжения на базе U_b . Чем больше U_b , тем больше величина I_{so} и тем большее значение $U_{доп}$. Емкость C_3 отфильтровывает переменную составляющую, т.к. ее импеданс $1/\omega_0 C_3 \ll R_3$.

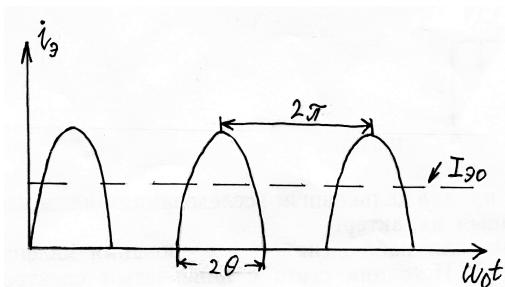


Рис. 15

Результирующее постоянное напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ} = E_{см} - U_{доп}$, где $E_{см}$ - начальное напряжение смещения между базой и эмиттером, заданное с помощью делителя $R_1 \div R_2$. Таким образом, рабочая точка транзистора будет смещаться 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.

8. Задание

1. Ознакомиться со схемой лабораторного макета генератора (см.Приложение) и измерительными приборами.
2. Измерить частоту генерируемых колебаний, для чего
 - (а) Переключатель "генератор-усилитель" поставить в положение "генератор";
 - (б) Включить емкость в цепи эмиттера;
 - (с) При минимальной связи установить на переходе база-эмиттер транзистора максимальное напряжение смещения $E_{см} = 0.7B$. Отсчет $E_{см}$ производится по стрелочному индикатору на передней панели макета. Напряжение источника питания на коллекторе $E_k = 9B$ и в процессе выполнения работы не изменяется;
 - (д) Увеличивая связь, добиться возбуждения генератора. Наличие автоколебаний регистрируется с помощью осциллографа и вольтметра, подключаемых соответственно к гнездам Γ_4 и Γ_2 ;
 - (е) Отключив осциллограф, подключить к гнезду Γ_4 частотомер и измерить частоту автоколебаний при двух значениях емкости контура. Отключить дополнительную емкость от контура генератора.
3. 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.

(a) Напряжение смещения максимальное.

- i. К гнезду Γ_2 подключить вольтметр, а к гнезду Γ_3 - осциллограф.
- ii. Установить максимальное напряжение $E_{\text{см}}$.
- iii. 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 $U_{\text{БЭ}} = U_{\text{БЭ}}(M)$ от величины M .
- iv. Зафиксировать характерные осцилограммы импульсов тока коллектора с указанием соответствующих им величин M .
- v. Повторить эти измерения при отключенной емкости в цепи эмиттера.

(b) Напряжение смещения $E_{\text{см}} = 0$.

- i. Установить напряжение смещения $E_{\text{см}} = 0$.
- ii. Установить максимальную обратную связь.
- iii. Включить емкость в цепи эмиттера.
- iv. Плавно увеличивая $E_{\text{см}}$, добиться возбуждения генератора. Изменяя связь, убедиться в наличии гистерезисной петли в зависимости $U_K = U_K(M)$.
- v. Уменьшая и увеличивая M , снять зависимости $U_K = U_K(M)$ и $U_{\text{БЭ}} = U_{\text{БЭ}}(M)$.
- vi. Характерные осцилограммы импульсов тока зарисовать с указанием M , при которых они получены.

4. Снять колебательные характеристики при напряжениях смещения $E_{\text{см}1}$ и $E_{\text{см}2}$.

(a) Напряжение смещения $E_{\text{см}} = 0$.

- i. Включить емкость в цепи эмиттера.
- ii. Переключатель "генератор-усилитель" поставить в положение "усилитель".
- iii. К гнезду Γ_1 подключить внешний генератор синусоидальных колебаний.
- iv. Частоту внешнего генератора подобрать такой, чтобы контур был настроен на резонанс. Для этого установить $U_{\text{ВХ}} \approx 0.05V$. Изменяя частоту внешнего генератора добиться максимального отклонения стрелки вольтметра и максимальной амплитуды изображения на экране осциллографа, подключенного к гнезду Γ_4 .
- v. Изменяя $U_{\text{ВХ}}$ от 0.01 до 0.3 В, снять зависимости $U_K = U_K(M)$ и $U_{\text{БЭ}} = U_{\text{БЭ}}(U_{\text{ВХ}})$. С помощью подключенного к гнезду Γ_3 осциллографа зафиксировать

ровать характерные осцилограммы тока коллектора и изменяя в его форме с указанием соответствующих им значений напряжения $U_{\text{ВХ}}$.

Для исключения погрешностей рекомендуется проводить измерения при одном положении переключателя уровня выходного сигнала внешнего генератора - 0.3 В.

(b) Напряжение смещения $E_{\text{см}2}$.

- i. Не изменяя частоты внешнего генератора, установить $E_{\text{см}} = E_{\text{см}2}$. Для этого
 - переключатель "генератор-усилитель" поставить в положение "генератор";
 - выполнить пункты i-iv раздела б задания 3 при включенной емкости C_s ;
 - установить переключатель "генератор-усилитель" вновь в положение "усилитель";
 - ii. Изменяя $U_{\text{ВХ}}$ от 0.01 до 0.3 В, снять зависимости $U_K = U_K(U_{\text{ВХ}})$ и $U_{\text{БЭ}} = U_{\text{БЭ}}(U_{\text{ВХ}})$. Зафиксировать характерные осцилограммы тока коллектора.
5. Снять зависимость напряжения на контуре от частоты подаваемого на усилитель напряжения

- (a) $E_{\text{см}} = E_{\text{см}2}$.
- (b) Переключатель "генератор-усилитель" поставить в положение "усилитель".
- (c) Изменяя частоту входного напряжения f в пределах от 20 кГц до значения f , несколько превышающего частоту генерации, измерить зависимость $U_K = U_K(f)$.
- (d) Форму колебаний на выходе наблюдать с помощью осциллографа, подключенного к гнезду Γ_4 .

9. Контрольные вопросы

1. Дать определение следующим понятиям:
 - комплексный коэффициент передачи линейного четырёхполюсника;
 - амплитудно-частотная и фазо-частотная 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?
11. Объяснить суть различия между мягким и жестким возбуждением автогенератора.

10. 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.