

Отчет по лабораторной работе №

Генератор гармонических колебаний

Работу выполнили студенты

Есюнин М.В., Есюнин Д.В.

430 группы

Преподаватель:

Орлов И.Я.

Содержание

1	Назначение автогенератора	2
2	Области использования	2
3	Принцип работы схемы автогенератора	2
4	Самовозбуждение автогенератора	2
4.1	Резонансный усилитель	4
4.2	Регенеративный усилитель	5
4.3	Ограничение нарастающих колебаний. Стационарный режим генератора	6
5	Анализ схемы автогенератора	7

1. Назначение автогенератора

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

2. 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.

3. 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.??) 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.?. На рис.?? 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

4. Самовозбуждение автогенератора

При включении в схему автогенератора (рис.??) 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.???. Обозначим через $K_1(\omega)$ и $K_2(\omega)$ комплексные коэффициенты передачи четырехполюсников прямой и обратной цепи соответственно

$$\dot{K}_1(\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вых1}}}{\dot{U}_{\text{вх1}}} \dot{K}_2(\omega) = \frac{\dot{U}_{\text{вых2}}}{\dot{U}_{\text{вх2}}}$$

где \dot{U} - комплексная амплитуда.

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

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

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

Поскольку

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{вых}} &= \dot{U}_{\text{вых1}} = \dot{U}_{\text{вх1}} \dot{K}_1(\omega) = \\ &= [\dot{U}_{\text{вх1}} + \dot{K}_2(\omega) \dot{U}_{\text{вых1}}] \dot{K}_1(\omega) \end{aligned}$$

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.??? 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.??? при названных условиях является автогенератором. Условия самовозбуждения вытекают из равенства

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

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 полу-

чило название "баланс амплитуд второе - "баланс фаз". Равенства (??) 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 Судет 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

4.1. 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 проходную 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 (4) 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 $S_{cp}(U_0)$ 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 $S_{cp}(U_0)$, рассмотрим рис.??, где изображены проходная характеристика транзистора и ее крутизна.

Различие рисунков ?? и ?? состоит в том, что в первом случае с помощью смещения $E_{см}$ 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'_{cp} и S''_{cp} являются значениями средней крутизны, соответствующими амплитуде U_0 . Нетрудно заметить, что при увеличении амплитуды входного колебания в случае рис.?? $S_{cp}(U_0)$ будет возрастать, в случае рис.?? - падать. На рис. ?? представлены два характерных вида зависимости $S_{cp}(U_0)$, при этом кривая 1 соответствует рис.??, кривая 2 - рис.???. 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.?? так же имеет два характерных вида. На рис.?? - кривая 1 и 2 соответствуют кривым 1 и 2 на рис.???. Поскольку при настройке контура усилителя на частоту усиливаемого сигнала фаза напряжения на контуре совпадает с фазой первой гармоники тока, то кривые на рис.?? отражают и характер зависимостей $U_k = f(U_0)$ Коэффициент усиления по первой гармонике при работе усилителя в режиме большого сигнала $\dot{K}(\omega_0)$ в соответствии с (4) и рис.?? является зависимым от U_0

$$\dot{K}_1(\omega) = \dot{U}_{\text{вых}} / \dot{U}_{\text{вх}} = \dot{U}_k / \dot{U}_{\text{вх}} = f(U_0) \quad (6)$$

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

Наряду с отмеченными положительными свойствами регенеративного усилителя, ему свойственен и существенный недостаток - опасность возбуждения усилителя за счет случайных изменений $|\dot{K}_1(\omega)|$.

4.3. 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.?? 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.?? будет уменьшаться, снижая $\dot{K}_1(\omega)$. Снижение $\dot{K}_1(\omega)$, в конечном итоге, приведет к тому, что будет выполнено условие

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

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

Определение стационарной амплитуды колебаний удобно проводить с использованием колебательной характеристики (рис.??) На рис.?? в одной системе координат представлены две зависимости (см.рис??)

$$U_{\text{вых1}} = K_1(\omega_0)U_{\text{вх1}}$$

- колебательная характеристика (кривая 1)

$$U_{\text{вх2}} = \frac{1}{K_2(\omega_0)}U_{\text{вых2}}$$

или

$$U_{\text{вых1}} = \frac{1}{K_2(\omega_0)}U_{\text{вх1}}$$

- прямая обратной связи (кривая 2). Точка пересечения кривых 1 и 2 (точка) 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.

Отметим, что точка O тоже удовлетворяет условию (7) и соответствует второму стационарному состоянию. Убедимся, что точка a соответствует устойчивому стационарному состоянию, 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 a .

Проведем аналогичные рассуждения относительно состояния в точке a . Пусть флуктуация выведет амплитуду напряжения на контуре из точки a 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 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.??).

Режим возбуждения автогенератора, проиллюстрированный рис.??, называют мягким, режим, соответствующий рис.?? - жестким режимом возбуждения. Различие между мягким и жестким режимами возбуждения, выявляемое при сравнении рис.?? и рис.??, наглядно прослеживается и в характере зависимости амплитуды стационарных колебаний от степени связи, т.е. от величины представленной на рис.?? для мягкого режима и на рис.?? - для жесткого.

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.??: 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.??).

5. 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.?. 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 схе-

мой по переменному току, изображенной на рис.???. Коллекторный ток

$$\begin{aligned} i_k &= i_C + i_R + i_L \\ i_C &= C \frac{dU_k}{dt} \\ i_L &= \frac{1}{L} \int U_k dt \\ i_r &= \frac{U_k}{R} \end{aligned}$$

- 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 $i_k(t) = i_k(U_6(t), U_k(t))$. Приемлимой 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 $U_{упр} = U_6 - DU_k$. 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 $U_6 = \frac{di_L}{dt}$, а $U_k = L \frac{di_L}{dt}$. Отсюда следует, что $U_{упр} = U_6 - DU_k = (M/L - D)U_k = \kappa U_k$. 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 $U_{ст}$ (рис.??). Найдем

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

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 $i_k = i_k(\kappa U_k)$ 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)