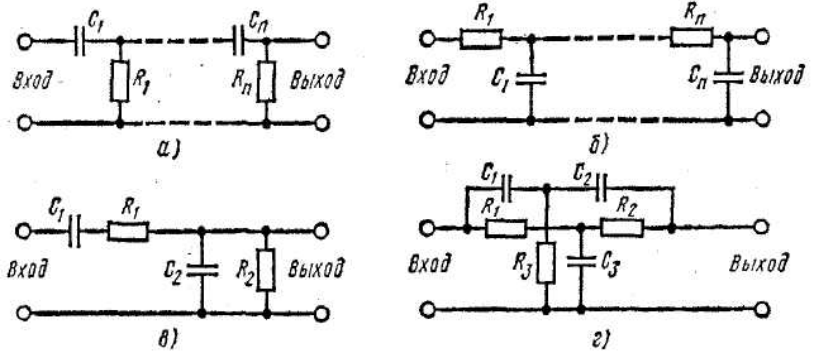


## Урок 81. RC-автогенераторы

Для получения гармонических колебаний низкой и инфранизкой частот (от нескольких сотен килогерц до долей герца) применяют автогенераторы, у которых в качестве звеньев обратных связей используются RC-четырёхполюсники. Такие автогенераторы получили название RC-автогенераторов. Применение RC-четырёхполюсников (Рис.1) вызвано тем, что LC-контуры на таких частотах становятся громоздкими, а такой электрический параметр, как добротность, ниже необходимых требований.

Рис. 1 — Частотно-зависимые цепи: а, б, — Г-образные RC-цепи; в — мост Вина; г — двойной T-образный мост

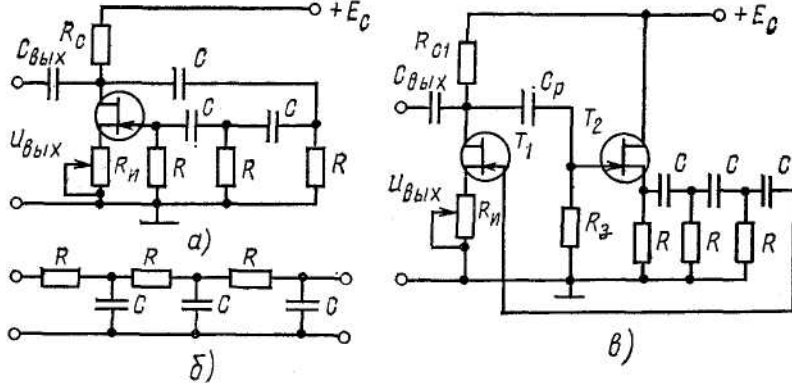


С помощью RC-автогенераторов можно получать колебания и высокой частоты вплоть до 10 МГц. Однако преимущества RC-автогенераторов проявляются именно на низких и инфранизких частотах. В этом частотном диапазоне за счет применения резисторов и конденсаторов RC-автогенераторы обладают более высокой стабильностью, имеют меньшие габариты, массу и стоимость, чем LC-автогенераторы.

RC-автогенератор с Г-образным RC-звеном обратной связи представляет собой однокаскадный усилитель, охваченный положительной обратной связью (рис. 2, а). Как известно, в однокаскадном усилителе без обратной связи входное и выходное напряжения сдвинуты по фазе на  $180^\circ$ . Если выходное напряжение этого усилителя подать на его вход, то получится 100%-ная отрицательная обратная связь. Для соблюдения баланса фаз, т. е. для введения положительной обратной связи в усилителе, выходное напряжение, прежде чем подать его на вход усилителя, необходимо сдвинуть по фазе на  $180^\circ$ . Если считать, что входное сопротивление усилителя очень большое, а выходное очень малое, а этим условиям отвечают в наибольшей степени усилители на полевых транзисторах, то фазовый сдвиг на  $180^\circ$  можно осуществить с помощью трех одинаковых RC-звеньев, каждое из которых изменяет фазу на  $60^\circ$ . Расчеты показывают, что баланс фаз в звене происходит на частоте  $f_0 = 1/(15,4 RC)$ , а баланс амплитуд — при коэффициенте усиления усилителя  $K \geq 29$ .

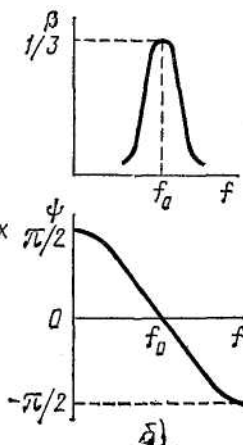
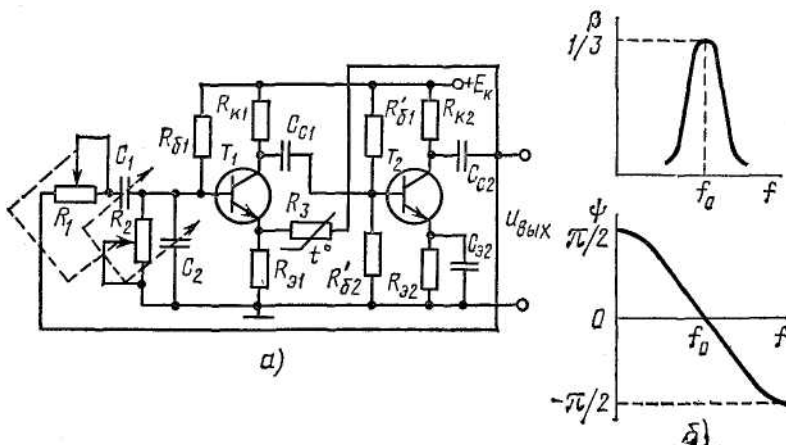
Если в автогенераторе, схема которого представлена на рис. 2, а, поменять местами резисторы и конденсаторы (рис. 2, б), то генерация автоколебаний будет на частоте  $f_0 = 1/(7,5 RC)$  при коэффициенте усиления усилителя  $K \geq 18,4$ .

Рис. 2. Схемы RC-автогенераторов с фазосдвигающей Г-образной RC-цепью: а — однокаскадного; б — с Г-образным RC-звеном обратной связи, в котором R и C поменяли местами; в — двухкаскадного



Отметим, что Г-образные RC-цепи иногда выполняют с количеством звеньев больше трех (чаще всего четырехзвенные). Увеличением количества звеньев в автогенераторе рис. 2, а можно повысить частоту генерации; еще большего увеличения частоты генерации можно добиться при смене мест резисторов и конденсаторов в RC-цепи

того же генератора. Для изменения частоты генерации в рассматриваемом генераторе необходимо изменять одновременно либо все сопротивления R, либо все емкости C. Заметим, что автогенераторы с Г-образными RC-цепями работают обычно на фиксированной частоте или в крайнем случае в узком перестраиваемом диапазоне.



Рассмотренный RC-автогенератор имеет ряд недостатков: 1) цепь обратной связи сильно шунтирует каскад усилителя, вследствие чего снижается коэффициент усиления и нарушается условие баланса амплитуд, т. е. возникающие колебания могут быть неустойчивыми; 2) генерируемые колебания имеют значительное искажение формы, вызванное тем, что условия самовозбуждения выполняются для гармоник с частотой, близкой к  $f_0$ , это объясняется отсутствием строгой избирательности к основной частоте Г-образных RC-цепей.

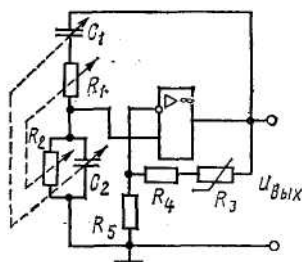
Рис. 3. RC-автогенератор с мостом Вина: а — схема автогенератора; б — амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики моста Вина

Для уменьшения шунтирующего влияния RC-цепей обратной связи вводят дополнительный каскад — истоковый повторитель. Включение истокового повторителя (рис. 2, в) позволяет выполнить условие баланса фаз и в то же время практически исключить влияние цепи обратной связи на коэффициент усиления усилителя. Для улучшения формы генерируемых колебаний в автогенераторы, схемы которых изображены на рис. 2, а, в, вводят отрицательную обратную связь, которая осуществляется с помощью резистора  $R_n$ .

RC-автогенератор с мостом Вина состоит из двух каскадов RC-усилителя и цепи обратной связи, являющейся мостом Вина (рис. 3, а). Этот генератор собран на биполярных транзисторах. Мост Вина состоит из резисторов  $R_1, R_2$  и конденсаторов  $C_1, C_2$ . На частоте  $f_0 = 1/(2\pi RC)$ , где  $R = R_1 = R_2$ , а  $C = C_1 = C_2$ , мост Вина имеет коэффициент передачи  $\beta = 1/3$  и нулевой угол сдвига фаз (рис. 3, б). Двухкаскадный усилитель в широком диапазоне частот, как известно, определяемом частотной и фазовой характеристиками, имеет постоянный коэффициент усиления много больше единицы и угол сдвига фаз между входным и выходным напряжениями,

равный нулю. Это позволяет в полосе пропускания усилителя поддерживать условия самовозбуждения автогенератора при регулировании частоты колебаний. При таком регулировании надо изменять либо сопротивления обоих резисторов, либо емкости обоих конденсаторов моста Вина. Следует отметить, что по сравнению даже с LC-автогенераторами, выполненными по схеме индуктивной трехточки, рассматриваемый автогенератор обеспечивает более простую перестройку частот в более широком диапазоне их изменения. По этой причине RC-автогенератор с мостом Вина чаще других автогенераторов применяют для получения синусоидальных колебаний в диапазоне частот  $1-10^7$  Гц.

В автогенераторе с мостом Вина усилитель должен иметь коэффициент усиления  $K \geq 3$ . В двухкаскадном усилителе, применяемом в данном случае, коэффициент усиления обычно значительно больше трех; следовательно, форма синусоидальных колебаний может быть сильно искажена. Во избежание этого вводят дополнительно отрицательную обратную связь, которая существенно повышает



стабильность работы автогенератора. Отрицательная обратная связь подается с помощью терморезистора R3 и резистора R<sub>31</sub>. В случае увеличения амплитуды выходного напряжения автогенератора за счет изменений параметров транзисторов, напряжения питания или других причин ток через терморезистор R3 возрастает, а его сопротивление уменьшается. В результате возрастает падение напряжения на резисторе R<sub>31</sub> и коэффициент усиления первого каскада снижается, что приводит к уменьшению амплитуды выходного напряжения автогенератора.

Рис. 4. Схема RC-автогенератора с мостом Вина на операционном усилителе

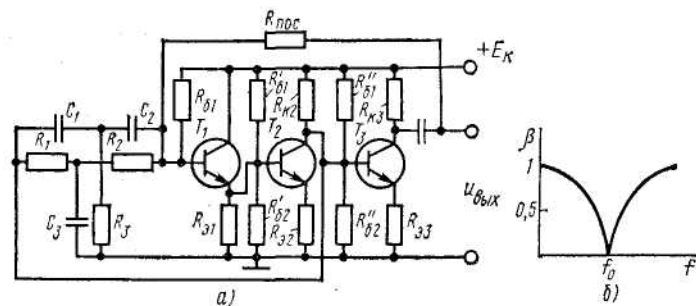
На рис. 4 изображена принципиальная схема RC-автогенератора с мостом Вина, в которой вместо двухкаскадного усилителя включен операционный усилитель. Работа его ничем не отличается от работы автогенератора, выполненного по схеме рис. 3, а. В таком генераторе мост Вина включают между выходным выводом ОУ и его неинвертирующим входом, чем достигается введение

положительной обратной связи. Резисторы R3, R4 и R5, соединяющие выход с инвертирующим входом ОУ, являются звеном отрицательной обратной связи. Если резисторы R4 и R5 определяют требуемый коэффициент усиления усилителя, то терморезистор R3 стабилизирует амплитуду и снижает нелинейные искажения выходного напряжения (если взять ОУ типа 140УД7, сопротивления переменных резисторов  $R_1=R_2=50$  кОм, емкости конденсаторов  $C_1=C_2=3300$  пФ, сопротивления  $R_4=8,2$  кОм и  $R_5=10$  кОм, то автогенератор сможет давать синусоидальные колебания в диапазоне от 1 до 10 кГц).

RC-автогенератор с симметричным двойным Т-образным мостом, схема которого приведена на рис. 5, а, содержит два каскада усилителя (на транзисторах T2 и T3), эмиттерный повторитель (на транзисторе T1), цепь положительной частотно-независимой обратной связи (на резисторе R<sub>пос</sub>) и цепь отрицательной обратной связи, являющуюся симметричным двойным Т-образным мостом. Цепь положительной обратной связи включают между коллектором усилителя на транзисторе T3 и базой эмиттерного повторителя, что обеспечивает выполнение условия баланса фаз.

Такое включение создает угол сдвига фаз, равный  $180^\circ$ , что является условием возникновения отрицательной обратной связи.

Рис. 5. RC-автогенератор с симметричным двойным Т-образным мостом: а — схема автогенератора; б — амплитудно-частотная характеристика двойного Т-образного моста

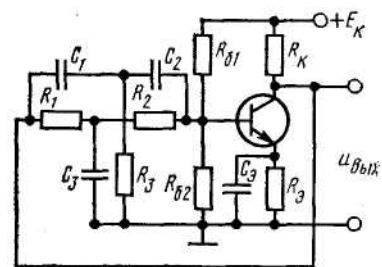


При отключении цепи отрицательной обратной связи в генераторе будет выполняться условие баланса амплитуд для широкого частотного диапазона, определяемого частотной характеристикой усилителя, и возникнут автоколебания, форма которых будет резко отличаться от синусоидальной.

При включении двойного Т-образного моста в качестве цепи

отрицательной обратной связи условие баланса амплитуд будет выполняться только для одной частоты. Это объясняется тем, что двойной Т-образный мост не пропускает гармоническую составляющую с частотой  $f_0$  (рис. 5, б), вследствие чего условие баланса амплитуд будет выполняться только для частоты  $f_0$ , а для всех остальных частот коэффициент усиления усилителя снизится и произведение  $|K||\beta|$  будет меньше единицы. Регулировку частоты колебаний автогенератора осуществляют изменением либо сопротивлений всех резисторов, либо емкостей всех конденсаторов двойного Т-образного моста. В противном случае нарушатся избирательные свойства моста. В данной схеме частота генерации  $f_0=1/(2\pi RC)$ . Если включить двойной Т-образный мост в схему автогенератора без эмиттерного повторителя, то мост будет сильно шунтироваться усилителем и условия самовозбуждения нарушатся.

С помощью несимметричного двойного Т-образного моста можно создать автогенератор на одном каскаде (или на нечетном количестве каскадов) с коэффициентом усиления  $K \geq 11$  (рис. 6). В таком автогенераторе двойной Т-образный мост включают как цепь отрицательной обратной связи. При выполнении условий  $C_1=C_2=C$ ,  $C_3=C/0,207$ ,  $R_1=R_2=R$ ,  $R_3=0,207R$  угол сдвига фаз между входным и выходным напряжениями моста составит  $180^\circ$  при коэффициенте передачи  $\beta=1/11$ . Частота колебаний в автогенераторе рис. 6  $f_0=1/(2\pi RC)$ . Схема RC-



автогенератора на операционном усилителе с двойным Т-образным мостом изображена на рис. 7.

Рис. 6. Схема RC-автогенератора с несимметричным двойным Т-образным мостом

Рис. 7. Схема RC-автогенератора на операционном усилителе с двойным Т-образным мостом

Контрольные вопросы:

1. Расскажите о достоинствах RC-автогенераторов.
2. Расскажите о свойствах частотно зависимых RC-цепей. Нарисуйте схемы, амплитудно- и фазочастотные характеристики.
3. Нарисуйте схемы, поясните назначение элементов и принцип работы RC-автогенераторов, изображенных на рисунках 2-7.

