

НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ



**УГИФС-11**

**АВТОГЕНЕРАТОР С ЕМКОСТНОЙ И ИНДУКТИВНОЙ  
ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.**

Тула, 2010 г.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

## АВТОГЕНЕРАТОР С ЕМКОСТНОЙ И ИНДУКТИВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ.

Цель работы: исследовать теоретические принципы построения схем, свойств, режимов работы и определение параметров и характеристик трехточечных автогенераторов.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

#### Введение.

Автогенераторы (АГ), так же как и генераторы с внешним возбуждением (ГВВ), являются преобразователями энергии постоянного тока в энергию электромагнитных колебаний высокой частоты. В то же время принципиальным отличием АГ от ГВВ является то, что в них сигнал возбуждения не подается на генераторный прибор от внешнего источника, а частота и амплитуда генерируемых колебаний определяются только свойствами самих АГ.

АГ находят широкое применение в возбуждителях радиопередатчиков, гетеродинах приемников, в радиолокационной и радионавигационной аппаратуре, в устройствах измерительной техники, установках промышленного использования токов высоких и сверхвысоких частот и т. п. Естественно, что и требования, предъявляемые к АГ в зависимости от их назначения, могут быть самыми разнообразными. Однако основным требованием, практически всегда предъявляемым к АГ вне зависимости от области его применения, является стабильность частоты генерируемых им колебаний.

Во многих случаях АГ должен допускать возможность целенаправленного изменения частоты генерируемых колебаний, например при переходе передатчика с одной рабочей частоты на другую, или в случае использования различных видов угловой модуляции или манипуляции.

Основными элементами АГ гармонических колебаний, так же как и ГВВ, являются генераторный прибор (ГП) и колебательная система (КС). В качестве ГП обычно используются трех- и четырехполюсные генераторные приборы (биполярные и полевые транзисторы, электронные лампы, микросхемы, многокаскадные усилители) или двухполюсные ГП (диоды Ганна, лавинно-пролетные и туннельные диоды). Вне зависимости от типа используемого ГП его назначение – компенсировать затухание колебаний в КС за счет введения в нее порций энергии от источника питания постоянного тока, что можно трактовать как подключение к КС отрицательного дифференциального сопротивления, компенсирующего сопротивление потерь. В случае использования двухполюсного ГП источник питания обеспечивает его работу на участке вольт-амперной характеристики с отрицательной крутизной. В трехполюсных ГП отрицательная крутизна их динамических характеристик в выходной системе координат создается за счет внешней положительной обратной связи.

### Классификация и принцип действия.

Классификация АГ. В зависимости от диапазона частот АГ делятся на две группы: ВЧ и СВЧ. Граница между ними составляет 300 МГц. Различительным признаком может являться не само значение частоты генерируемых колебаний, а тип используемых электрических цепей. В ВЧ генераторах используются цепи с сосредоточенными, а в СВЧ - с распределенными параметрами.

Способы стабилизации частоты автоколебаний:

- параметрическая с использованием обычных колебательных систем;
- кварцевая с использованием в качестве резонатора кристалла кварца;
- с диэлектрическим резонатором (только в СВЧ диапазоне);
- молекулярная за счет индуцированного возбуждения атомов.

По типу электронного прибора и схеме различают два типа АГ:

- с применением электронного прибора с положительной обратной связью,
- с применением генераторного диода (туннельного, лавинно-пролетного или диода Ганна).

По взаимодействию с другими звеньями аппаратуры различают АГ - действующие в автономном режиме, в режиме синхронизации частоты внешним сигналом и в составе устройства автоматической подстройки частоты. По использованию в составе радиотехнического устройства возможно следующее разделение АГ:

- опорные, с повышенной стабильностью частоты, синхронизирующие работу всех звеньев и каскадов устройства;
- диапазонные, перестраиваемые по частоте, в том числе и в составе синтезатора частот.

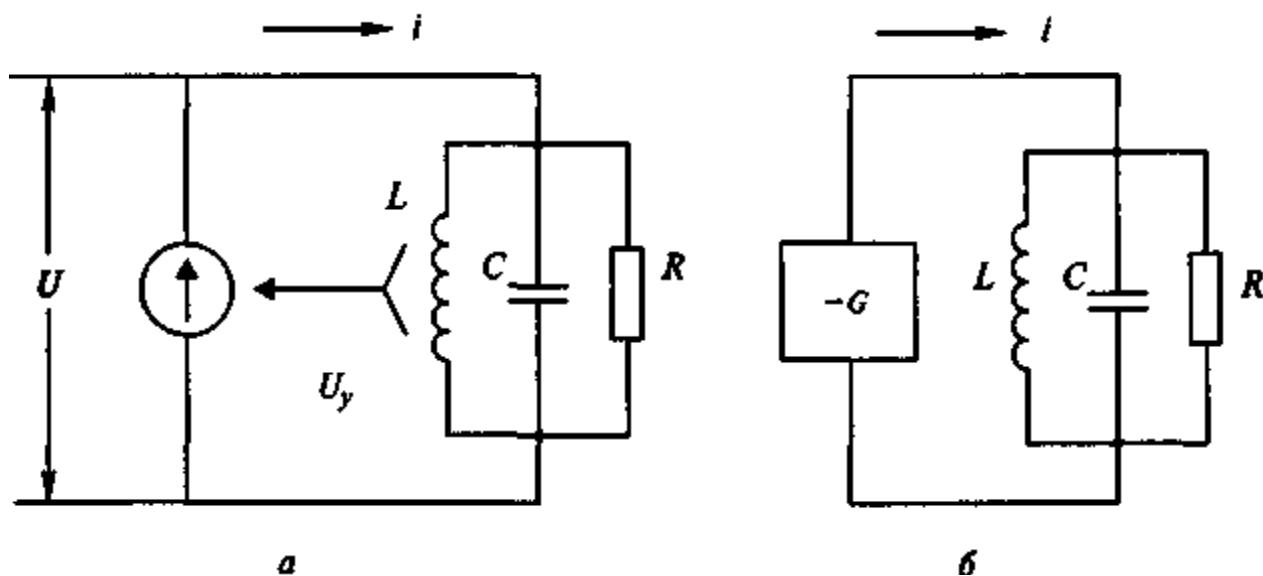


Рис. 1.1. Схемы автогенераторов: а) с применением электронного прибора с положительной обратной связью; б) с применением генераторного диода (туннельного, лавинно-пролетного или диода Ганна).

Работу АГ характеризуют следующие параметры: диапазон частот, мощность автоколебаний в нагрузке, нестабильность частоты.

В АГ первого типа используется электронный прибор, представляемый в виде нелинейного генератора тока  $i(u_y)$ , где  $u_y$  - управляющее напряжение (рис. 1.1, а). За счет цепи обратной связи часть мощности сигнала из колебательной системы поступает на вход электронного прибора. После усиления поступившие колебания возвращаются в колебательную систему, компенсируя потери и поддерживая устойчивый режим автоколебаний. При этом необходимо соблюдение условия синхронизма, состоящее в равенстве фаз колебаний, отобранных из колебательной системы и вновь туда поступивших.

Основой второго типа АГ являются специальные генераторные диоды, в эквивалентной схеме которых имеется отрицательная активная проводимость (например, по причине падающего участка в ВАХ или запаздывания сигнала в приборе). Такой прибор при подключении к колебательной системе компенсирует в ней потери, благодаря чему поддерживается режим автоколебаний (рис. 1.1, б).

### Установившийся режим автоколебаний.

После включения АГ в нем начинается переходный процесс, в течение которого амплитуда автоколебаний возрастает от 0 до некоторого значения  $U_m$ . По окончании переходного процесса, длящегося  $t_{пер}$ , устройство переходит в режим установившихся автоколебаний (рис. 1.2). Время  $t_{пер}$  можно найти, составив и решив нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее работу АГ.

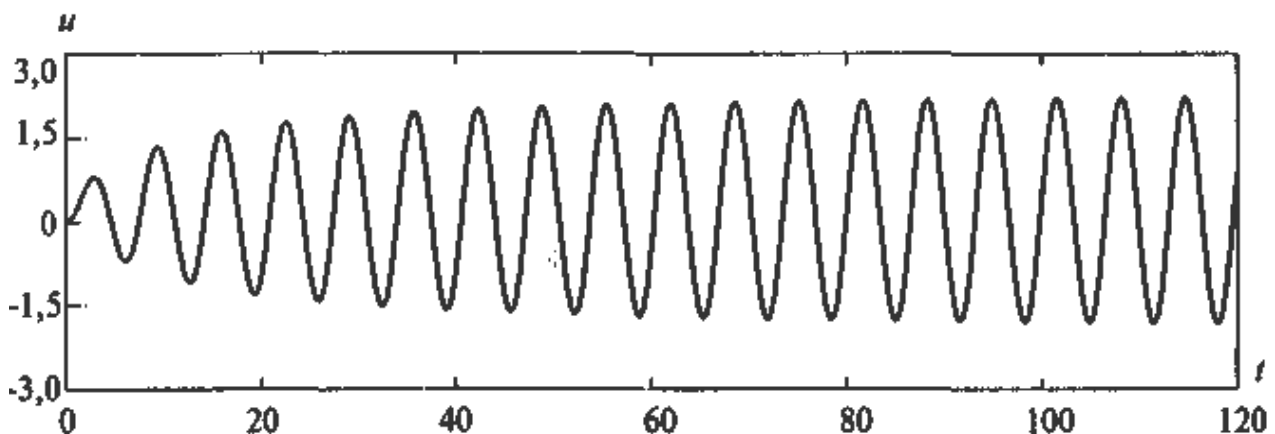


Рис. 1.2. Установление автоколебаний в АГ.

В тех случаях, когда отсутствует необходимость определения  $t_{\text{пер}}$ , можно ограничиться исследованием только установившегося режима работы. Для такого анализа удобен метод гармонического баланса.

Ток электронного прибора  $i(t)$  в АГ может существенно отличаться от синусоидального вида и представлять собой периодическое колебание, состоящее из косинусоидальных или иной более сложной формы импульсов. Разложив периодическое колебание в ряд Фурье, выделим из него 1-ю гармонику сигнала, для которой запишем:  $I_1 = I_m \alpha_1$ , где  $I_m$  - амплитуда импульса. Введем параметр - крутизну характеристики электронного прибора по 1-й гармонике сигнала:

$$S_y = I_1 / U_y = I_m \alpha_1 / U_y,$$

где  $U_y$  - амплитуда напряжения на входе прибора, и запишем систему уравнений для комплексных амплитуд 1-й гармоники сигнала:

$$I_1 = \dot{S}_y U_y; \quad U_m = I_1 \dot{Z}_{\text{экв}}; \quad U_y = \dot{K} U_m, \quad (1.1)$$

где  $U_m$  - амплитуда гармонического напряжения на контуре (ранее было принято, что колебательная система фильтрует все гармоники, кроме 1-й);  $\dot{Z}_m$  - эквивалентное сопротивление контура на частоте 1-й гармоники сигнала;  $\dot{K}$  комплексный коэффициент обратной связи.

Совместное решение (1.1) дает основное уравнение АГ в комплексной форме по 1-й гармонике сигнала:

$$\dot{S}_y \dot{Z}_{\text{экв}} \dot{K} = 1 \quad (1.2)$$

Это уравнение распадается на уравнения для произведения модулей и суммы фаз, соответственно называемые уравнениями баланса амплитуд и фаз:

$$S_y Z_{\text{экв}} K = 1 \quad (1.3)$$

$$\varphi_y + \varphi_{\text{экв}} + \varphi_K = 2\pi n \quad (1.4)$$

где  $\varphi_S$ ,  $\varphi_{\text{экв}}$ ,  $\varphi_K$  - соответственно фазовые углы средней крутизны, эквивалентного сопротивления и коэффициента обратной связи.

Уравнение баланса амплитуд (1.3) указывает на необходимость пополнения энергии в контур за счет цепи обратной связи, которое покрывало бы потери в нем, а уравнение баланса фаз (1.4) - на соблюдение условия фазировки: дополнительные колебания, вводимые в контур, должны совпадать по фазе с уже существующими. Количество дополнительной энергии можно регулировать за счет модуля коэффициента обратной связи  $K$ , а фазирование - за счет его фазы. Поскольку электронный прибор поворачивает фазу сигнала на величину, близкую к  $\pi$ , то согласно (1.4) на такую же величину должен происходить поворот фазы сигнала и за счет цепи обратной связи. Данному требованию отвечает трехточечная схема АГ (рис. 1.3).

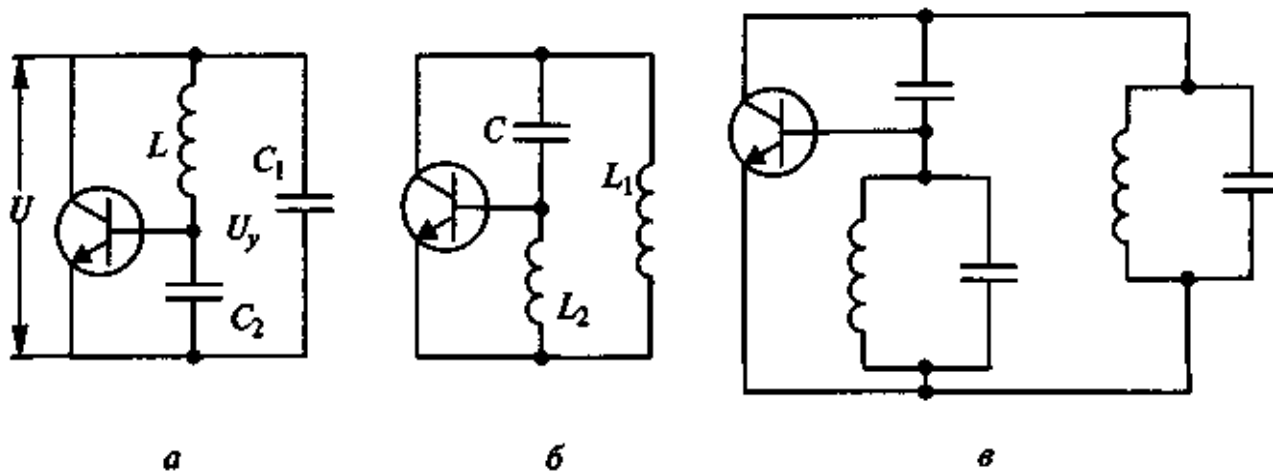


Рис. 1.3. Трёхточечная схема автогенераторов.

Первая из схем (рис. 1.3, а) называется емкостной, в ней модуль  $K=C_1/C_2$ , вторая (рис. 1.3, б) - индуктивной, в ней модуль  $K=L_2/L_1$ .

Обе схемы могут рассматриваться как эквивалентные по отношению и к двухконтурной (рис. 1.3, в) и к иным схемам автогенератора.

С помощью уравнений (1.3) можно определить амплитуду автоколебаний в установившемся режиме, для чего представим систему (1.1) в виде двух уравнений:

$$\begin{aligned} I_1 &= S_y(U_y) U_y \\ I_1 &= \left( \frac{1}{K R_{\text{экв}}} \right) \cdot U_y \end{aligned} \quad (1.5)$$

Их совместное решение позволяет найти амплитуды тока  $I_1$  и напряжения:  $U_m = I_1 R_m$  в установившемся режиме. Графическое решение уравнений приведено на рис 1.4. Для существования устойчивого режима автоколебаний необходима одна точка А пересечения графиков. Согласно общей теории устойчивости стационарный режим АГ является устойчивым, если малые отклонения амплитуды относительно установившегося значения возвращают систему в первоначальное состояние.

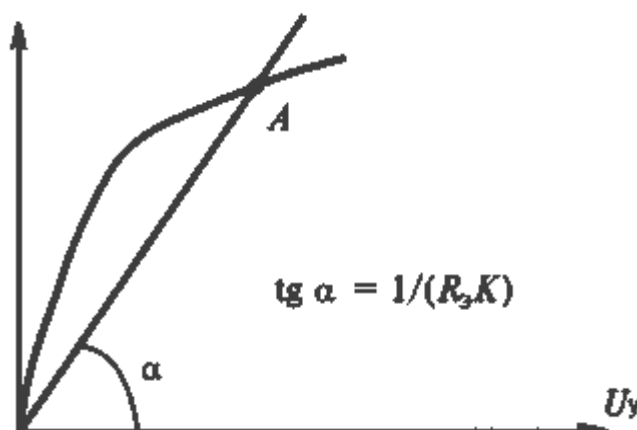


Рис. 1.4. Графическое решение уравнений (1.5)

Пусть колебания синусоидальны и определяются выражением:  $u(t) = U_{уст} e^{\alpha(U)t} \cos \omega t$ . Тогда согласно сформулированному условию устойчивости следует иметь  $\alpha(U) = 0$  при  $U = U_{уст}$ ,  $\alpha(U) < 0$  при  $U > U_{уст}$ ,  $\alpha(U) > 0$  при  $U < U_{уст}$ , что эквивалентно следующему неравенству:

$$d \left( \frac{dU}{dt} \right) / dU < 0 \quad (1.6)$$

### Принципиальные электрические схемы автогенераторов.

При выполнении (1.6) любое увеличение или уменьшение амплитуды  $U$  относительно  $U_{уст}$  возвращает систему в первоначальное состояние, что свидетельствует об устойчивости стационарного режима автоколебаний. Пример полной электрической схемы одноконтурного транзисторного АГ с цепью питания и смещения приведена на рис. 1.5, а, двухконтурного - на рис. 1.5, б.

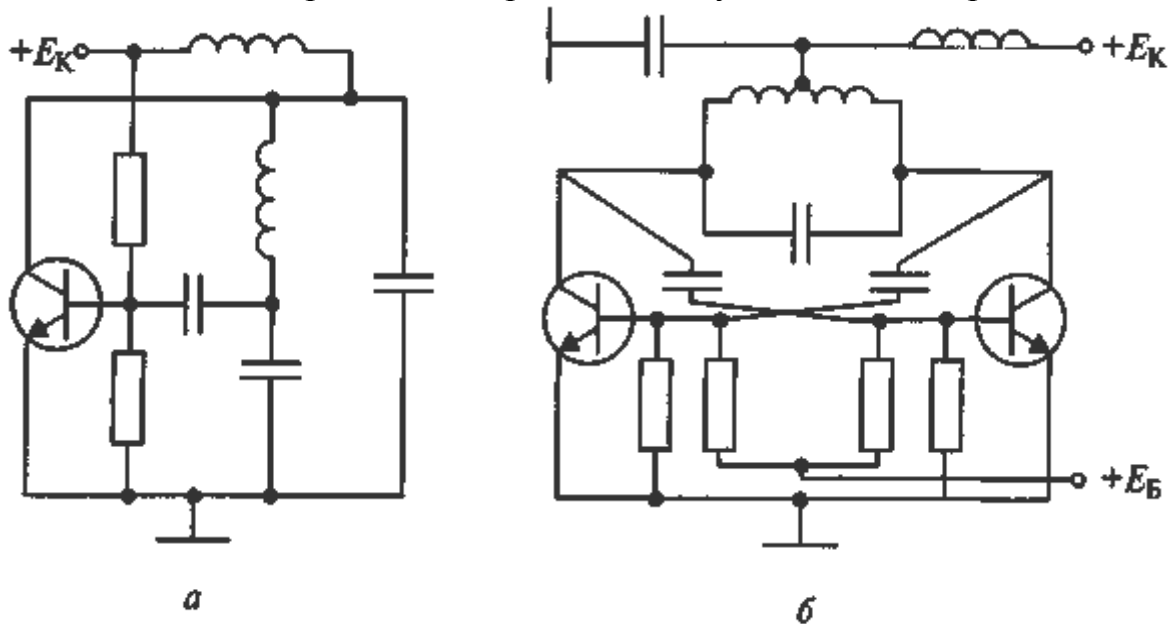


Рис. 1.5. Схемы транзисторного автогенератора: а) одноконтурного; б) двухконтурного.

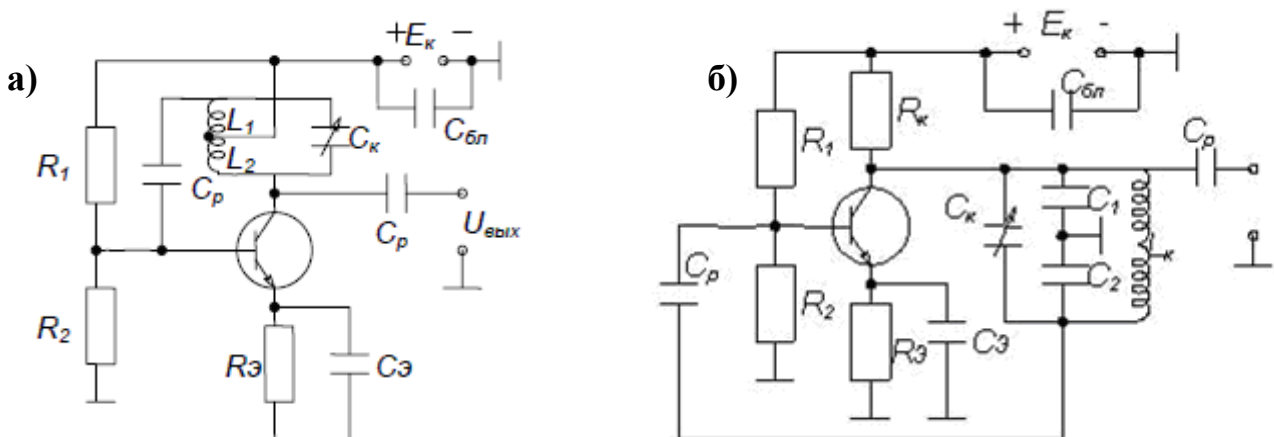


Рис. 1.5-1. Схемы транзисторного автогенератора: а) трёхточечная схема с автотрансформаторной ОС; б) трёхточечная схема с ёмкостной ОС.

Транзисторный диапазонный автогенератор рис. 15-1 а) собран по трёхточечной схеме с автотрансформаторной ОС, с комбинированным напряжением смещения на базе: от источника  $E_K$  через делитель  $R_1R_2$  и автоматическое смещение за счет  $I_{K0}$ , создаваемое на резисторе  $R_3$ . Питание коллекторной цепи последовательное через колебательный контур. Подключение нагрузки не полное, что уменьшает влияние нагрузки на частоту АГ:

$$\beta_{oc} = \frac{L_1}{L_1 + L_2}; \quad f_{\Gamma} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C_K}}$$

Транзисторный диапазонный АГ рис. 15-1 б) собран по трёхточечной схеме с ёмкостной ОС, с комбинированным напряжением смещения на базе, с параллельной схемой питания коллектора, неполным включением контура в цепь нагрузки:

$$\beta_{oc} = \frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}; \quad f_{\Gamma} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\left(\frac{C_1C_2}{C_1 + C_2} + C_K\right)L_K}}$$

### Стабильность частоты автогенераторов.

Выходное напряжение АГ в общем случае является гармоническим колебанием, модулированным по амплитуде и фазе (частоте) за счет воздействия дестабилизирующих факторов и внутренних флуктуационных процессов (шумов). Мгновенная частота такого колебания:

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t) + \varepsilon(t)\omega_0 t \quad (1.7)$$

помимо неизменной составляющей (первое слагаемое в (1.7)) имеет быстрые и медленные компоненты.

Компоненты, описываемые вторым слагаемым в (1.7), обязаны своим происхождением шумам, вибрациям, пульсациям питающих напряжений и другим быстро изменяющимся воздействиям, носящим обычно случайный характер. Третье слагаемое в (1.7) учитывает медленные изменения частоты, имеющие в основном детерминированный характер и обусловленные в первую очередь старением деталей АГ, их саморазогревом и изменением климатических условий.

Для высокостабильных АГ  $\varepsilon(t) = 10^{-9} \dots 10^{-13}$  1/сут, поэтому скольконибудь заметные изменения частоты могут проявляться только за значительное время наблюдения  $T_H$ , а при малых  $T_H$  частоту рассматривают как случайный



процесс, удовлетворяющий условиям стационарности и эргодичности.

Поскольку измерение статистических характеристик связано с усреднением за конечный временной интервал  $\tau$ , под значением частоты квазигармонического колебания понимают усредненное значение частоты  $\omega_{\text{ср}}(t, \tau)$ , определяемое на интервале  $T_H$ :

$$\omega_{\text{ср}}(t_1, \tau) = \omega_{\text{ср}}(t_1, T_H) + \Delta\omega_{\text{ср}}(t_1, \tau),$$

где  $\omega_{\text{ср}}(t_1, T_H) = \frac{1}{T_H} \int_{t_1}^{t_1+T_H} \omega(t) dt$  – среднее значение частоты на интервале  $T_H$ ;

$\Delta\omega_{\text{ср}}(t_1, \tau)$  – усредненное уклонение частоты. При этом величины  $\omega_{\text{ср}}(t_1, \tau)$ ,

$\omega_{\text{ср}}(t_1, T_H)$  и  $\Delta\omega_{\text{ср}}(t_1, \tau)$  сами являются случайными функциями, зависящими не только от времени  $t_1$ , но и от интервалов наблюдения и усреднения.

Одними из наиболее широко используемых статистических характеристик среднего значения частоты являются спектральная плотность мощности флуктуаций частоты  $S(\Omega)$  и дисперсия  $\sigma^2$ . Поскольку измерение статистических характеристик неустойчивости всегда ограничено конечным интервалом наблюдения, для оценки дисперсии  $\sigma^2$  используют соотношение:

$$\sigma^2(\tau, T_H) = 2 \int_0^{\infty} S(\Omega) \left( \frac{\sin 0,5\Omega\tau}{0,5\Omega\tau} \right)^2 \left[ 1 - \left( \frac{\sin 0,5\Omega T_H}{0,5T_H} \right)^2 \right] d\Omega.$$

Нетрудно заметить, что фильтрующий множитель  $\left( \frac{\sin 0,5\Omega\tau}{0,5\Omega\tau} \right)^2$  в последнем выражении исключает вклад быстрых (высокочастотных) спектральных составляющих  $S(\Omega)$  в оценку  $\sigma^2$ , а множитель  $\left[ 1 - \left( \frac{\sin 0,5\Omega T_H}{0,5T_H} \right)^2 \right]$  – медленных (низкочастотных). Таким образом, выбирая конкретные значения  $\tau$  и  $T_H$ , можно учитывать в соотношении для  $\sigma^2$  лишь определенную часть энергетического спектра  $S(\Omega)$ .

Различная природа быстрых и медленных изменений частоты и отмеченная зависимость  $\sigma^2$  от  $\tau$  и  $T_H$  обуславливают целесообразность введения понятий кратковременной и долговременной нестабильностей частоты и стандартных интервалов наблюдения и усреднения. Так для кратковременной нестабильности принято:  $T_H = 100$  с, а  $\tau = 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$  с, а для долговременной –  $T_H = 1$  год, 6 месяцев, 1 месяц,  $\tau = 1$  сут.

При оценке долговременной нестабильности из-за больших времен усреднения и наблюдения вкладом высокочастотных (случайных) составляющих  $S(\Omega)$  можно пренебречь и считать, что

$$\Delta\omega_D = \omega_{cp}(t_1 + T_H, \tau) - \omega_{cp}(t_1, \tau).$$

Как уже отмечалось, воздействие внешних дестабилизирующих факторов на параметры КС и ГП приводит к изменению одного или нескольких фазовых углов, входящих в уравнение баланса фаз, что сопровождается изменением частоты генерируемых колебаний.

При определении изменения частоты колебаний АГ под воздействием различных дестабилизирующих факторов можно воспользоваться соотношением:

$$\frac{\Delta\omega_G}{\omega_G} = \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \varphi_s}{2Q}\right) \frac{\Delta\omega_K}{\omega_K} + \frac{\operatorname{tg} \varphi_s}{2Q} \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta\varphi_s}{2Q \cos^2 \varphi_s}, \quad (1.8)$$

где  $\Delta\omega_K$ ,  $\Delta\varphi_s$  и  $\Delta Q$  – малые приращения  $\omega_K$ ,  $\varphi_s$  и  $Q$  соответственно, вызванные действием дестабилизирующих факторов.

$Q$  – нагруженная добротность колебательной системы;  $\omega_G$  – частота генерируемых колебаний.

Анализ выражения (1.8) показывает, что с увеличением  $Q$  и уменьшением  $\varphi_s$  уменьшается влияние относительного изменения фазового угла средней крутизны и добротности колебательной системы на частоту генерируемых колебаний. Причина отмеченного явления заключается в том, что с ростом  $Q$  увеличивается крутизна фазовой характеристики  $\left| \frac{d\varphi_y}{d\omega} \right|$  при  $\omega = \omega_G$  и уменьшается приращение  $\Delta\omega_G$ , обусловленное изменением фазовых углов. Аналогичным образом можно пояснить и уменьшение чувствительности  $\omega_G$  к изменению  $\varphi_s$  при уменьшении абсолютного значения фазового угла средней крутизны, поскольку при этом  $\omega_G$  стремится к резонансной частоте контура  $\omega_K$  и

$\left| \frac{d\varphi_y}{d\omega} \right|$  возрастает. Что же касается отклонения частоты  $\omega_{\Gamma}$  от номинального

значения, обусловленного изменением собственной резонансной частоты колебательной системы, то оно, как это следует из (1.8), практически не зависит от значения  $\varphi_s$  и  $Q$ , и с достаточной точностью можно считать, что  $\Delta\omega_{\Gamma} = \Delta\omega_{\kappa}$ . Само изменение резонансной частоты  $\omega_{\kappa}$  обусловлено изменением  $C_{\kappa}$  и  $L_{\kappa}$  и в первом приближении равно:

$$\frac{\Delta\omega_{\kappa}}{\omega_{\kappa}} = \frac{1}{\omega_{\kappa}} \left( \frac{\partial\omega_{\kappa}}{\partial L_{\kappa}} \Delta L_{\kappa} + \frac{\partial\omega_{\kappa}}{\partial C_{\kappa}} \Delta C_{\kappa} \right) = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L_{\kappa}}{L_{\kappa}} + \frac{\Delta C_{\kappa}}{C_{\kappa}} \right).$$

Таким образом, обеспечение высокой стабильности частоты, т. е. незначительного изменения  $\omega_{\Gamma}$  при изменении внешних воздействий, требует в первую очередь малой чувствительности  $\Delta\omega_{\Gamma}$  к изменению параметров колебательной системы. Поэтому при построении высокостабильных АГ следует использовать усилительные элементы, в которых на частоте генерации еще не проявляются инерционные свойства, и колебательные системы с высокой добротностью и эталонностью. Под эталонностью понимается способность КС поддерживать постоянство собственной резонансной частоты  $\Delta\omega_{\kappa}$  при изменении тех или иных внешних воздействий.

Таким образом, Параметры, характеризующие работу АГ, можно разбить на две группы. К первой относятся величины, определяющие энергетические свойства АГ - колебательную мощность и КПД. Во вторую группу входят параметры, характеризующие частотные свойства АГ:

- диапазон частот  $f_1 \dots f_2$ , в пределах которого возможна перестройка частоты;
- требуемое, номинальное значение частоты генерируемого сигнала  $f_{\text{НОМ}}$ ;
- долговременная нестабильность частоты за определенный интервал времени;
- кратковременная нестабильность частоты и фазы сигнала;
- чистота спектра и уровень шума излучаемого сигнала.

Кратковременная нестабильность частоты и связанная с ней чистота спектра излучаемого сигнала в некоторых случаях играют решающую роль в определении свойств радиосистемы.

Сигнал, генерируемый АГ, не является монохроматическим. Из-за различных физических причин происходят изменения амплитуды и фазы сигнала, которые носят как регулярный, так и случайный характер. В результате сигнал автогенератора можно представить в виде:

$$u(t) = [U_0 + \Delta U_1(t) + \Delta U_2(t) + \Delta U_{\text{ш}}(t)] \times \cos[\omega_{\text{НОМ}} t + \Delta\varphi_1(t) + \Delta\varphi_2(t) + \Delta\varphi_{\text{ш}}(t)] \quad (1.9)$$

где  $\Delta U_1(t)$ ,  $\Delta \varphi_1(t)$  - функции, определяющие относительно медленные изменения амплитуды и фазы сигнала под влиянием внешних условий, например температуры окружающей среды;  $\Delta U_2(t)$ ,  $\Delta \varphi_2(t)$  - функции, определяющие периодические изменения амплитуды и фазы сигнала под влиянием пульсаций питающего напряжения или воздействия на аппаратуру механических вибраций;  $\Delta U_{ш}(t)$ ,  $\Delta \varphi_{ш}(t)$  - функции, описывающие случайные изменения амплитуды и фазы сигнала, обусловленные физическими процессами, протекающими в электронных приборах, например дробовыми флюктуациями потока носителей заряда. На основании соотношения, связывающего частоту колебаний с фазой:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (1.10)$$

частота сигнала имеет те же составляющие, что и фаза:

$$f(t) = f_{\text{ном}} + \Delta f_1(t) + \Delta f_2(t) + \Delta f_{ш}(t) \quad (1.10)$$

где  $\Delta f_1(t)$ ,  $\Delta f_2(t)$ ,  $\Delta f_{ш}(t)$  - функции, соответственно описывающие медленные, периодические и случайные изменения частоты сигнала, первая из которых определяет долговременную нестабильность частоты, а две другие кратковременную. Пример зависимости (1.10) приведен на рис. 1.6.

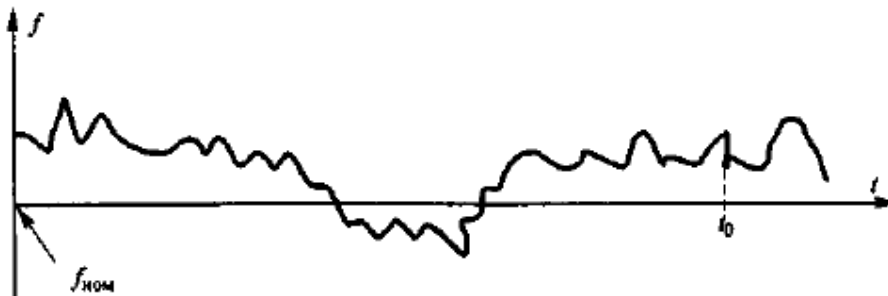


Рис. 1.6. График нестабильности частоты АГ.

Долговременная нестабильность частоты за период времени  $0 \dots t_0$  определяется как усредненное значение по  $N$  измерениям или как максимальное отклонение частоты от номинального значения:

$$\Delta f_{\text{дл}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |f_k - f_{\text{ном}}| \quad \text{или} \quad \Delta f_{\text{дл}} = |f_{\text{мах}} - f_{\text{ном}}| \quad (1.11)$$

Норма на долговременную нестабильность частоты составляет для современных радиотехнических систем  $\frac{\Delta f_{\text{дл}}}{\Delta f_{\text{ном}}} = 10^{-9} \dots 10^{-6}$ .

1-я составляющая кратковременной нестабильности при  $\Delta f_2(t) = \Delta f_m(t) \cos(\Omega t)$  есть амплитуда колебаний частоты  $\Delta f_m$ ;

2-я составляющая кратковременной нестабильности есть среднеквадратическое значение флуктуации частоты относительного среднего значения, обозначаемая как  $\Delta f_{\text{ср. ш.}}$ ;

Действие случайного сигнала приводит к модуляции шумом амплитуды и частоты несущих колебаний и размытию спектральной линии сигнала АГ. Источником этого шума является активное сопротивление потерь колебательной системы и поток носителей заряда электронного прибора. Второй фактор превалирует над первым, так как мощность тепловых шумов активных сопротивлений значительно меньше мощности шума электронного прибора. Факторы, влияющие на стабильность частоты АГ, называются дестабилизирующими (внутренние и внешние). К внутренним относятся: неточность первоначальной установки частоты, изменение питающего напряжения, влияние нагрузки, прогрев элементов под действием выделяемого тепла в схеме, деградация элементов, ведущая к изменению их параметров со временем. К внешним: изменение температуры, влажности, давления окружающей среды; механические воздействия, например вибрация.

Общие рекомендации по улучшению стабильности частоты АГ:

- мощность АГ не должна превышать 10...20 МВт;
- связь с нагрузкой должна быть ослаблена;
- питающие напряжения должны быть стабилизированы не хуже 1 - 2%;
- влияние влажности и давления должно быть устранено герметизацией АГ;
- влияние температуры должно быть уменьшено термостатированием АГ;
- добротность колебательной системы должна быть максимально высокой.

### Анализ работы автогенератора на трёхполюсном активном элементе.

При построении АГ на трёхполюсном активном элементе (АЭ), например транзисторе, энергия колебаний передается из выходной цепи АЭ в колебательную систему при условии, что управляющее током коллектора колебательное напряжение  $u_{БЭ}(t)$  имеет определенный фазовый сдвиг относительно напряжения  $u_{КЭ}(t)$  между коллектором и эмиттером.

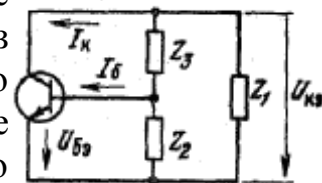


Рис. 1.7

Колебательная система представлена схемой, содержащей комплексные сопротивления  $Z_1(j\omega)$ ,  $Z_2(j\omega)$  и  $Z_3(j\omega)$ . Передача напряжения из выходной цепи транзистора на его вход обеспечивается цепью обратной связи, состоящей из элементов  $Z_2(\omega)$  и  $Z_3(\omega)$  рис. 1.7.

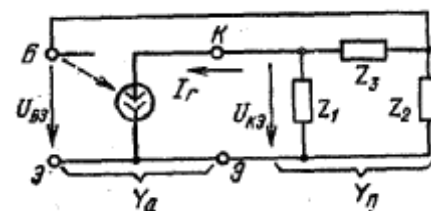


Рис. 1.8

Предположим, как и ранее, что переменные составляющие колебательных напряжений  $u_{КЭ}(t)$  и  $u_{БЭ}(t)$  являются почти гармоническими, а связь между  $i_K(t)$  и  $u_{БЭ}(t)$  определяется статической характеристикой

$ik(u_{бэ})$ . Входное сопротивление транзистора будем считать большим по сравнению с  $|Z_2(\omega)|$ , т.е. моделью транзистора считаем генератор тока, управляемого напряжением рис. 1.8.

Пусть  $U_{кэ}$  и  $U_{бэ}$  — комплексные амплитуды первых гармоник напряжений  $u_{кэ}(t)$  и  $u_{бэ}(t)$ ;  $I_k(U_{бэ})$  — комплексная амплитуда первой гармоники тока коллектора;

$$S_1(U_{бэ}) = I_k(U_{бэ}) / U_{бэ} \text{ - средняя крутизна.}$$

$$Z_H = Z_1(Z_2 + Z_3) / (Z_1 + Z_2 + Z_3).$$

$$U_{кэ} = -Z_H I_k(U_{бэ}) = -Z_H S_1(U_{бэ}) U_{бэ}.$$

Коэффициент обратной связи:  $k = -U_{бэ} / U_{кэ} = -Z_2 / (Z_2 + Z_3)$

$$(1 - k Z_H S_1(|k| U_{кэ})) U_{вк} = 0.$$

Управляющее сопротивление:  $Z_y = k Z_H$ .

$$Z_y = -Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2 + Z_3)$$

$$(1 - Z_y S_1(|k| U_{кэ})) U_{кэ} = 0.$$

$$[-k(j\omega_r) S_1(|k(j\omega_r)| U_{кэ}) + 1 / Z_H(j\omega_r)] U_{кэ} = 0.$$

$$S_1(U_{бэ}) k(j\omega_r) Z_H(j\omega_r) = 1$$

$$S_1(U_{бэ}) Z_y(j\omega_r) = 1.$$

$$S_1 = S_1 \exp(j\varphi_s) \quad k = k \exp(j\varphi_k), \quad Z_H = Z_H \exp(j\varphi_H)$$

Уравнения баланса амплитуд и баланса фаз:

$$S_1(U_{бэ}) k(\omega_r) Z_H(\omega_r) = 1; \quad \varphi_S(U_{бэ}) + \varphi_k(\omega_r) + \varphi_H(\omega_r) = -2\pi n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Автогенератор гармонических колебаний с хорошей стабильностью частоты должен иметь КЦ с малыми потерями, поэтому у сопротивлений:

$$Z_1 = r_1 + jX_1; \quad Z_2 = r_2 + jX_2; \quad Z_3 = r_3 + jX_3$$

вещественные части малы по сравнению с мнимыми:

$$r_1 \ll |X_1|; \quad r_2 \ll |X_2|; \quad r_3 \ll |X_3|.$$

С учетом этого управляющее сопротивление:

$$Z_y = -\frac{(r_1 + jX_1)(r_2 + jX_2)}{r_1 + r_2 + r_3 + j(X_1 + X_2 + X_3)} \approx \frac{X_1 X_2}{r + jX} = \frac{R_y}{1 + jX/r},$$

$$\text{где } r = r_1 + r_2 + r_3; \quad X = X_1 + X_2 + X_3; \quad R_y = X_1 X_2 / r.$$

Пусть  $S_1 \approx S_1$ ,  $\varphi_s \approx 0$ ,  $S_{1m} \approx 0$ , тогда

$$S_1(U_{бэ}) R_y = 1;$$

$$X(\omega_r) = X_1(\omega_r) + X_2(\omega_r) + X_3(\omega_r) = 0.$$



При  $S_1 > 0$  вещественное управляющее сопротивление  $R_y$  должно быть положительным на частоте колебаний, которая определяется из  $X(\omega_r) = X_1(\omega_r) + X_2(\omega_r) + X_3(\omega_r) = 0$ . Поэтому при  $r > 0$  реактивные сопротивления  $X_1$  и  $X_2$  должны иметь один знак, а  $X_3$  — противоположный. Если  $X_1 > 0$  и  $X_2 > 0$ , т. е. представляют индуктивности, то  $X_3 < 0$  и представляет емкость. В этом случае получается индуктивная трехточечная схема АГ.

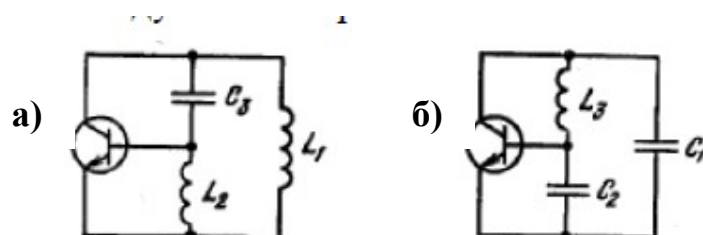


Рис. 1.9. Схемы транзисторного автогенератора: а) трёхточечная схема с индуктивной ОС ; б) трёхточечная схема с ёмкостной ОС.

При  $X_1 < 0$  и  $X_2 < 0$ ,  $X_3 > 0$  — получается емкостная трехточечная схема АГ.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

### Приборы и оборудование.

Исследование автогенераторов, собранных по трёхточечной схеме с индуктивной ОС и трёхточечной схеме с ёмкостной ОС проводится на лабораторном стенде УгиФС-11, принципиальная электрическая схема которого приведена на рис. 2.1.

### Установка учебная УГиФС-11

#### Автогенератор с ёмкостной и индуктивной обратной связью



Рис. 2.1 Принципиальная электрическая схема учебной установки УгиФС-11 для исследования трёхточечных автогенераторов гармонических колебаний.

Установка предназначена для проведения лабораторных работ по курсу «Радиотехника и электроника» в высших и средне-технических учебных заведениях.

Установка может быть использована в различных курсах, изучающих основы электронной техники в высших и средних специальных учебных заведениях.

Установка выполнена в климатическом исполнении УХЛ, категория 4.2 ГОСТ 15150-69 для эксплуатации в помещении при температуре от 10°C до 35°C и относительной влажности до 80 %.

Учебная установка конструктивно состоит из нескольких элементов, конструктивно объединенных в одном корпусе:



- набора изучаемых элементов и устройств;
- стабилизированного источника питания, подающего питание нужной полярности и значения на все элементы схемы;

Напряжение со встроенного стабилизированного источника питания (клемма) +5 Вольт подаётся при помощи перемычки из комплекта типа «тюльпан — тюльпан» на коллектор транзистора VT1 (клемма XS7) либо VT2 (клемма XS22) для исследования схемы соответственно с ёмкостной либо индуктивной обратной связью. Клеммы «КОРПУС  $\perp$ » соединены между собой внутри лабораторного стенда, соединение их перемычками не требуется. К остальным выводам учебной установки по мере необходимости могут подсоединяться мультиметры для измерения токов и напряжений в соответствующих элементах схемы а также электронный осциллограф перемычкой типа «BNC – ТЮЛЬПАН, ТЮЛЬПАН» для наблюдения за формой сигналов.

### Порядок выполнения.

1. Перед включением установки в сеть необходимо убедиться в целостности сетевых и соединительных проводов. Все соединительные провода и контрольные точки использовать следует только по назначению, запрещается замыкать выход нагрузки и выходы контрольных точек.
2. Включить установку и электронный осциллограф в сеть  $\sim 220$  В с помощью прилагаемого силового сетевого кабеля евро-стандарта. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели учебного модуля и осциллографа в положение «ВКЛ», при этом должен загореться сигнальный индикатор «СЕТЬ».
3. Подать напряжение  $U_{пит.}$  на схему автогенератора с ёмкостной обратной связью, воспользовавшись переключкой из комплекта типа «ТЮЛЬПАН — ТЮЛЬПАН», соединив выводы +5 Вольт источника питания с гнездом XS7.
4. Поставить один из мультиметров в режим измерения постоянного напряжения DCV 20 и подключить щупы мультиметра к выводам XS8 – XS13 схемы, соблюдая полярность (красный щуп к положительной клемме XS8, черный щуп к корпусной клемме XS13).
5. Измерить напряжение питания схемы  $U_{пит.}$  Напряжение питания должно составлять  $U_{пит.} = 5 \pm 0,5$  В. Отключить мультиметр от схемы.
6. Поставить один из мультиметров в режим измерения постоянного тока DCA 20 mA и подключить его вместо переключки в разрыв цепи питания к контактам +5 Вольт — XS7 схемы, соблюдая полярность.
7. Второй мультиметр из комплекта установить в режим измерения сопротивления  $\Omega$  200K.
8. Подключить вход Y электронного осциллографа с помощью кабеля «BNC – ТЮЛЬПАН, ТЮЛЬПАН» к клеммам XS12 – XS13 схемы: красный «ТЮЛЬПАН» к клемме XS12 (сигнал с эмиттера VT1), чёрный «ТЮЛЬПАН» к клемме XS13 (корпус).
9. Вращая ручки установки сопротивления базового делителя транзистора VT1 R1 и R2 получить устойчивую генерацию сигнала (автоколебательный процесс).
10. Вращением ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV (ВОЛЬТ/ДЕЛ и ВРЕМЯ/ДЕЛ) и ручек POSITION осей X и Y на электронном осциллографе добиться визуально наиболее удобного изображения сигнала. Для дополнительной синхронизации можно использовать ручку LEVEL. Ручка «Y-LINE-EXT» метода синхронизации должна находиться в положении Y (внутренняя синхронизация). При этом следует учитывать, что оси X (время) и Y (амплитуда) откалиброваны правильно (т. е. подписи у ручек VOLTS/DIV и TIME/DIV верны) только при повернутых до упора ручках плавной регулировки VOLT VAR. и TIME VAR.
11. Зарисовать сигнал по клеткам на миллиметровую бумагу с экрана осциллографа. Определить период T, частоту  $\nu$  и амплитуду  $A_{MAX}$  колебаний с помощью электронного осциллографа для данного положения ручек R1 и R2. С

помощью мультиметра, находящего в режиме измерения сопротивления  $\Omega$  200К измерить сопротивление базового делителя R1, подключившись к клеммам XS1 – XS2 учебной установки и сопротивление базового делителя R2, подключившись к клеммам XS4 – XS5.

12. Установить вращением ручки R1 значение сопротивления R1 в пределах 5 — 7 кОм по показаниям мультиметра в режиме омметра, подключившись к клеммам XS1 – XS2 учебной установки.

13. Вращая ручку R2, определить момент срыва генерации и замерить значение этого сопротивления, подключившись к клеммам XS4 – XS5 мультиметром в режиме омметра.

14. Снять зависимость тока потребления схемы  $I_k$  от значения сопротивления R2 базового делителя  $I_k(R2)$ . Обратить внимание на скачки тока  $I_k$  при появлении и срыве генерации.

15. Прodelать п. 13 — 14 для других 5 — 7 положений ручки R1.

16. Установить вращением ручки R2 значение сопротивления R2 в пределах 0,5 — 1 кОм по показаниям мультиметра в режиме омметра, подключившись к клеммам XS4 – XS5 учебной установки.

17. Вращая ручку R1, определить момент срыва генерации и замерить значение этого сопротивления, подключившись к клеммам XS1 – XS2 мультиметром в режиме омметра.

18. Снять зависимость тока потребления схемы  $I_k$  от значения сопротивления R1 базового делителя  $I_k(R1)$ . Обратить внимание на скачки тока  $I_k$  при появлении и срыве генерации.

19. Определяя амплитуду сигнала  $A_{MAX}$  по показаниям электронного осциллографа для каждого значения сопротивления R1, снять зависимость амплитуды сигнала от R1 базового делителя схемы  $A_{MAX}(R1)$ .

20. Повторить пп. 17 — 19 для других 5 — 7 значений R2.

21. Для нескольких значений R1 и R2, наблюдать сигнал на базе транзистора VT1, подключив красный сигнальный вывод измерительного щупа электронного осциллографа к клемме XS3, а также на коллекторе VT1, подключив красный сигнальный вывод измерительного щупа электронного осциллографа к клемме XS11. Обратите внимание, что черный щуп «КОРПУС» должен быть всегда подключен к корпусному выводу схемы XS13.

22. Сделать вывод о качестве генерируемого сигнала и нелинейных искажениях на базе, коллекторе и эмиттере транзистора.

23. Подключиться измерительным осциллографическим щупом к эмиттеру транзистора VT1 (клемме XS12).

24. Вращая ручки установки сопротивления базового делителя транзистора VT1 R1 и R2 получить устойчивую генерацию сигнала (автоколебательный процесс).

25. Подключая ёмкости из комплекта параллельно встроенному конденсатору  $C1=1$  нФ (использовать клеммы XS8 – XS10), с помощью электронного осциллографа снять зависимость частоты генерируемого

синусоидального сигнала  $\nu$  [Гц] и амплитуды  $A_{\text{MAX}}$  от общей ёмкости  $C1$  схемы:  $\nu$  ( $C1$ ),  $A_{\text{MAX}}(C1)$ . Общая ёмкость  $C1$  определяется как сумма встроенной ёмкости 1 нФ и внешней подключаемой ёмкости: 6,8 нФ, 10 нФ, 22 нФ, 33 нФ и 47 нФ из комплекта. При срыве генерации подстраивать автогенератор ручками  $R1$  и  $R2$ . Для данной схемы  $C2=10$  нФ,  $C3=47$  нФ,  $R3=100$  Ом.

26. Приступить к исследованию схемы автогенератора с индуктивной обратной связью. Для этого подать питание на схему автогенератора с индуктивной обратной связью, подключив мультиметр к клеммам +5 В — XS22 схемы, предварительно установив прибор в режим измерения постоянного тока DCA 200m.

27. Подключить вход Y электронного осциллографа с помощью кабеля «BNC – ТЮЛЬПАН, ТЮЛЬПАН» к клеммам XS24 – XS26 схемы: красный «ТЮЛЬПАН» к клемме XS24 (сигнал с эмиттера VT2), чёрный «ТЮЛЬПАН» к клемме XS26 (корпус).

28. Второй мультиметр из комплекта установить в режим измерения сопротивления  $\Omega$  200K.

29. С помощью мультиметра, находящего в режиме измерения сопротивления  $\Omega$  200K измерить сопротивление  $R4$ , подключившись к клеммам XS14 – XS15 учебной установки

30. Вращая ручку установки сопротивления  $R4$  получить устойчивую генерацию сигнала (автоколебательный процесс).

31. Снять зависимости тока потребления схемы  $I_k$  от  $R4$  по показаниям мультиметра в режиме миллиамперметра, частоты и амплитуды генерируемого сигнала от  $R4$  по показаниям электронного осциллографа:  $I_k(R4)$ ,  $\nu$  ( $R4$ ),  $A_{\text{MAX}}(R4)$ . Обратить внимание на скачки тока  $I_k$  при появлении и срыве генерации.

32. Подключая ёмкости из комплекта параллельно встроенным конденсаторам  $C4=10$  нФ (использовать клеммы XS16 – XS18) и  $C5=10$  нФ (использовать клеммы XS19 – XS20), с помощью электронного осциллографа снять зависимость частоты генерируемого сигнала  $\nu$  [Гц] и амплитуды  $A_{\text{MAX}}$  от общих ёмкостей  $C4$  и  $C5$  схемы:  $\nu$  ( $C4$ ),  $A_{\text{MAX}}(C4)$ ,  $\nu$  ( $C5$ ),  $A_{\text{MAX}}(C5)$ . Общая ёмкость  $C4$  или  $C5$  определяется как сумма встроенной ёмкости 10 нФ и внешней подключаемой ёмкости: 6,8 нФ, 10 нФ, 22 нФ, 33 нФ и 47 нФ из комплекта. При срыве генерации подстраивать автогенератор ручкой  $R4$ .

33. Для нескольких значений  $C4$  и  $C5$ , наблюдать сигнал на базе транзистора VT2, подключив красный сигнальный вывод измерительного щупа электронного осциллографа к клемме XS17, а также на коллекторе VT2, подключив красный сигнальный вывод измерительного щупа электронного осциллографа к клемме XS23 и на катушке самоиндукции  $L2$ , подключившись к XS25. Обратите внимание, что чёрный щуп «КОРПУС» должен быть всегда подключен к корпусному выводу схемы XS26.

34. Сделать вывод о качестве генерируемого сигнала и нелинейных искажениях на базе, коллекторе и эмиттере транзистора VT2, а также на

катушке индуктивности L2.

35. По окончании работы поставить переключатель «СЕТЬ» на панели установки и осциллографа в положение «выкл», при этом должен погаснуть индикатор сеть и вынуть сетевые вилки из розеток.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.**

1. Объяснить необходимые и достаточные условия существования колебаний в автогенераторе (АГ).
2. Каким должен быть характер реактивных сопротивлений в обобщенной трехточечной схеме АГ для выполнения баланса фаз?
3. На основании анализа колебательных характеристик объяснить ход диаграмм срыва при мягком и жестком самовозбуждении.
4. Для чего в схемах АГ используется комбинированное смещение?
5. Каковы причины возникновения прерывистой генерации?
6. Какими преимуществами обладает емкостная трехточечная схема АГ перед индуктивной и почему?
7. Объяснить характер зависимостей, описывающих изменение реактивной и резистивной составляющих сопротивления КВР вблизи резонансного промежутка.
8. Перечислить основные дестабилизирующие факторы и объяснить их влияние на частоту генерируемых колебаний.
9. Что такое кратковременная и долговременная нестабильности частоты, какими причинами они вызваны и как измеряются?
10. Как зависит кратковременная нестабильность частоты от времени наблюдения и усреднения?

**РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.**

1. Устройства генерирования и формирования радиосигналов: Учеб. пособие для вузов / Л. А. Белов, В. М. Богачев, М. В. Благовещенский и др.; Под ред. Г. М. Уткина, В. Н. Кулешова и М. В. Благовещенского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1994. 416 с.
2. Генераторы высоких и сверхвысоких частот: Учеб. пособие для вузов / О. В. Алексеев, А. А. Головков, А. В. Митрофанов и др. М.: Высш. шк., 2003. 326 с.
3. Шапиро Д. Н., Паин А. А. Основы теории синтеза частот. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.
4. Соловьев А. А. Автогенераторы гармонических колебаний и синтезаторы частоты: Учеб. пособие для вузов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000. 94 с.
5. «Радиопередающие устройства», В.В. Шахгильдян и др.; Под ред. В.В.Шахгильдяна. - М.: «Радио и связь», 2003.

**ДЛЯ СВОБОДНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»**