

Министерство образования и науки Российской Федерации

---

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО  
Институт компьютерных наук и технологий

*Ю.Н. Дьяченко*

**РС-генератор синусоидальных сигналов**

**Методические указания к лабораторным работам**

**Санкт-Петербург**

**2018**

Методические указания содержат описания лабораторных работ, выполняемых на лабораторных стендах, а также с применением программы моделирования электрических и электронных схем Multisim. Целью работы является обучение студентов знанию основных схемотехнических особенностей генераторов синусоидальных сигналов и особенностей их функционирования.

## Общие принципы функционирования генераторов

Генераторы – это устройства формирующие переменные сигналы заданной формы. Генераторы можно разделить на две основные группы:

- генераторы гармонических (синусоидальных) сигналов;
- генераторы сигналов специальной формы – прямоугольного, треугольного, пилообразного и др.

Общая обязательная черта всех генераторов заключается в наличии цепи положительной обратной связи (ПОС), которая как правило действует совместно со стабилизирующей цепью отрицательной обратной связи (ООС).

### Генераторы синусоидальных колебаний

Структурная схема генератора гармонических или синусоидальных колебаний показана на рис. 14.1 [1,2,4]. Она включает в свой состав усилитель прямой цепи  $U_c$  с коэффициентом усиления  $k(f)$  и цепь ПОС – ЦОС с коэффициентом передачи  $\beta(f)$ . Коэффициенты зависят от частоты сигнала, поэтому математическое описание работы генераторов удобно представлять комплексными соотношениями, а окончательные практические результаты представлять в виде амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик.

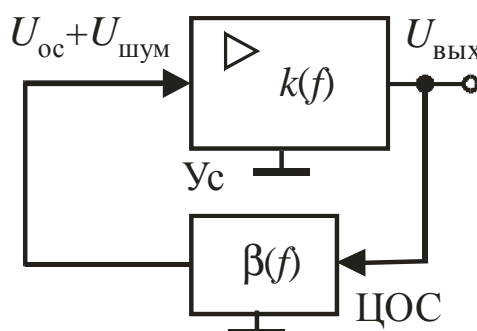


Рис. 14.1.

Для возникновения и генерации устойчивых автоколебаний в генераторе необходимо, чтобы выполнялись два условия [1,2,4]:

$$\begin{cases} \psi_k(f) + \psi_\beta(f) = n \cdot 2\pi \\ k(f) \cdot \beta(f) \geq 1 \end{cases} \quad (14.1)$$

$\Psi_k(f)$  и  $\Psi_\beta(f)$  – углы фазового сдвига усилителя  $U_c$  и ЦОС.

Первое условие – *условие баланса фаз*: сдвиг фаз в замкнутом контуре, состоящем из последовательно включенных усилителя и цепи ЦОС кратен  $2\pi$  радиан. Следовательно, напряжение, имеющееся на входе  $U_c$  пройдя по замкнутому контуру возвращается на вход в виде  $U_{oc}$  в той же фазе, что обеспечивается при наличии ПОС.

Второе условие - *баланс амплитуд*: петлевое усиление  $k\beta$  для напряжения в замкнутом контуре не менее 1, что гарантирует компенсацию ослабления сигнала в пассивной ЦОС ( $\beta < 1$ ) за счет усилительных свойств активного элемента  $U_c$  ( $k > 1$ ).

Форма автоколебаний зависит от характера и параметров цепи ПОС и усилителя  $U_c$  –  $k(f)$ ,  $\beta(f)$ , диапазона частот в котором выполняются условия возникновения и поддержания автоколебаний.

В генераторе синусоидальных колебаний условия *баланса фаз* и *амплитуд* выполняются на *одной частоте* – частоте генерации автоколебаний  $f_0$ :

$$\Psi_k(f_0) + \Psi_\beta(f_0) = n \cdot 2\pi \quad (14.2)$$

$$k(f_0) \cdot \beta(f_0) = 1 \quad (14.3)$$

Для генерации гармонических сигналов низкой и средней частоты наибольшее распространение получили RC-генераторы на основе ОУ [1,2,3,4].

#### *Принцип работы RC-генератора.*

При подаче напряжения питания на генератор автоколебания в первый момент отсутствуют. Сами по себе колебания возникнуть не могут, для запуска процесса генерации нужен начальный «толчок» или возмущающий фактор. В практических схемах генераторов роль такого «толчка» выполняют собственные шумы  $U_{шум}$ , существующие в электронных устройствах и присутствующие на входе усилителя  $U_c$ .

Гармоники шумов  $U_{\text{шум}}$ , с частотами близкими  $f_0$ , проходя по замкнутому контуру из усилителя  $U_c$  и ЦОС, придут к источнику шума без изменений фазы. Если коэффициент усиления по контуру для данных гармоник больше единицы, то напряжение на выходе  $U_c$  начнет возрастать и в итоге установятся устойчивые колебания.

В RC-генераторах наиболее часто используют Г-образные и двойные Г-образные RC-цепи [3]. На рис. 14.2 представлены варианты схем таких цепей, представляющих собой последовательное соединение простейших RC-фильтров нижних и верхних частот, составляющие в итоге полосовой RC-фильтр. На частоте квазирезонанса угол фазового сдвига в таком фильтре составляет  $\Psi_{\beta}(f_0) = 0$ .

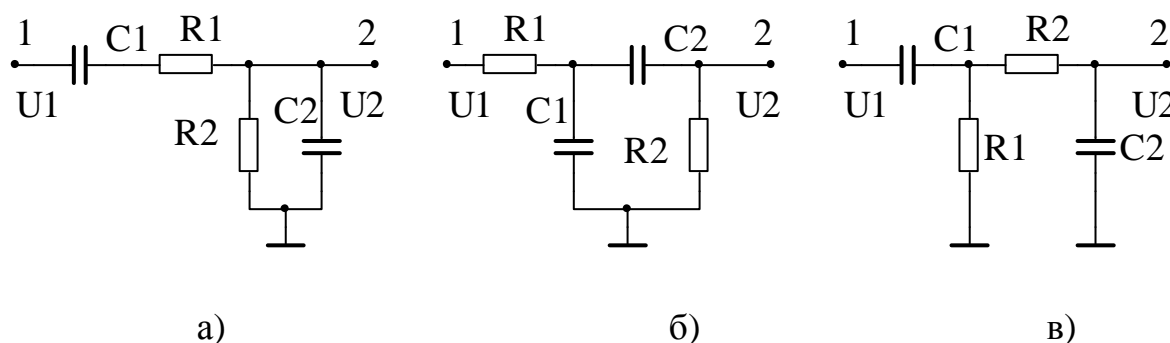


Рис. 14.2.

Следовательно, если в генераторе используются цепи рис. 14.2, то для обеспечения баланса фаз необходимо применить усилитель, также обеспечивающий сдвиг фаз  $\Psi_k(f_0) = 0$ .

Генераторы RC типа строят и на основе лестничных потенциально-токовых RC-цепей с использованием инвертирующего усилителя [3], однако в настоящей работе данный вариант генератора не рассматривается.

Генератор, представленный на рис. 14.3, в котором использована цепь ПОС рис. 14.2а, называют генератором на основе моста Вина [1,2,3,4]. При использовании RC-цепей рис. 14.2б и рис. 14.2в схема их подключения аналогична. В прямой цепи генератора использован неинвертирующий усилитель (НУ) на основе ОУ с цепью ООС  $R_3, R_4$ . Если выбран быстродействующий

ОУ так, что его частота единичного усиления  $f_1 \gg f_0$ , то угол фазового сдвига НУ на частотах  $f \leq f_0$  будет практически равен нулю.

$\Psi_{\text{НУ}}(f_0) = \Psi_k(f_0) \rightarrow 0$  за счет действия глубокой ООС.

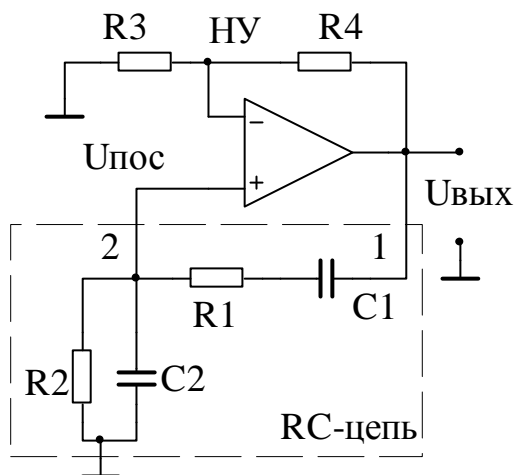


Рис. 14.3.

#### *Расчет элементов RC-генератора*

Расчет параметров генератора на основе всех RC-цепей рис. 14.2 производится аналогичным образом, с использованием одинаковых формул.

Частота квазирезонанса RC-цепей, следовательно и автоколебаний генератора, определяется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C1C2R1R2}}. \quad (14.4)$$

Обычно, для уменьшения номенклатуры точных элементов используют равные сопротивления  $R1 = R2 = R$  и равные емкости  $C1 = C2 = C$  (что дополнительно обеспечивает максимальное значение коэффициента  $\beta$ ) тогда частота автоколебаний определяется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14.5)$$

АЧХ  $\beta(f)$  и ФЧХ  $\psi_\beta(f)$  приведенных на рис. 14.2 полосовых RC-фильтров описываются соотношениями

$$\beta(f) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{f}{f_0} \frac{1}{\sqrt{(f/f_0)^4 + 7(f/f_0)^2 + 1}}, \quad (14.6)$$

$$\psi_\beta(f) = \arctan\left(\frac{1 - (f/f_0)^2}{3(f/f_0)}\right). \quad (14.7)$$

Из (14.6) и (14.7) видно, что коэффициент передачи и угол фазового сдвига RC-цепей на частоте  $f_0$  составляют соответственно

$$\beta(f_0) = \frac{1}{3}, \quad \psi_\beta(f_0) = 0$$

Следовательно, с учетом (15.3) коэффициент усиления НУ должен быть

$$K_{\text{ну}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{пос}}} = 1 + \frac{R4}{R3} = 3 \quad (14.8)$$

При построении генератора необходимо учитывать, что возникнуть автоколебания в замкнутом контуре могут только в случае, если начальный коэффициент петлевого усиления был больше единицы –  $K_{\text{ну}} \cdot \beta > 1$ . Кроме того, этот коэффициент может изменяться под воздействием влияющих факторов, например, уменьшиться при изменении температуры, что приведет к срыву автоколебаний. Поэтому начальное значение коэффициента задают с некоторым запасом  $K_{\text{ну}}\beta = (1,05 \div 1,1)$  на гарантированный запуск и неустойчивость элементов генератора. Однако для того, чтобы генератор поддерживал устойчивые синусоидальные автоколебания на частоте квазирезонанса  $f_0$ , необходимо точное выполнение равенства  $\beta K_{\text{ну}} = 1$  на этой частоте, что обеспечивается автоматической настройкой генератора. Так, при запуске генератора происходит возрастание амплитуды колебаний. В итоге на выходе усилителя произойдет ограничение амплитуды напряжения за счет его перехода в режим насыщения. Этот эффект приводит к автоматическому уменьшению эквивалентного коэффициента усиления усилителя до среднего

значения за период  $\overline{K}_{\text{нУ}} = 3$ , при котором для петлевого усиления выполняется условие  $\beta \overline{K}_{\text{нУ}} = 1$ .

В установившемся режиме форма колебаний будет искажена за счет ограничения сигнала в усилителе, как изображено на рис 14.4. Количественно нелинейные искажения  $U_{\text{вых}}$  можно оценить коэффициентом гармоник  $k_{\text{гар}}$ , значение которого может достигать (5 ÷ 10)% . Кроме того, при насыщении усилителя, возможно появление дополнительного фазового сдвига сигнала, а это приводит к изменению и нестабильности частоты генерируемых колебаний.

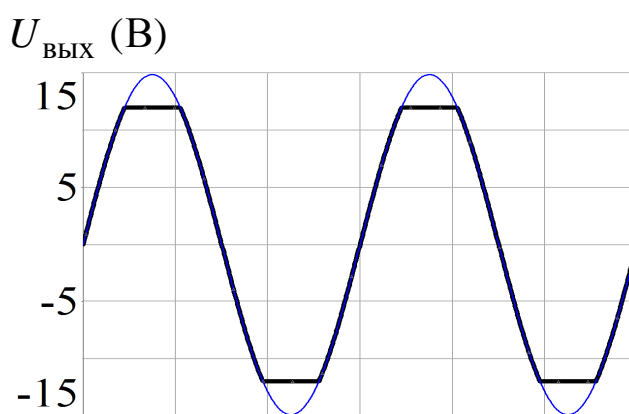


Рис 14.4. График нелинейных искажений

Для уменьшения искажений выходного сигнала генератора используют автоматическую регулировку усиления (АРУ) в НУ, обеспечивающую уменьшение  $K_{\text{нУ}}$  при возрастании амплитуды  $U_{\text{вых}}$  до определенного уровня [2,3]. Усилитель при этом работает на линейном участке амплитудной характеристики, не входя в насыщение. В простейшем случае в цепь обратной связи усилителя вводят специальные нелинейные звенья, роль которых могут выполнять ограничитель на стабилитронах, нелинейные мостовые цепи и т.д. Кроме снижения искажений цепь АРУ позволяет стабилизировать амплитуду колебаний на заданном уровне.

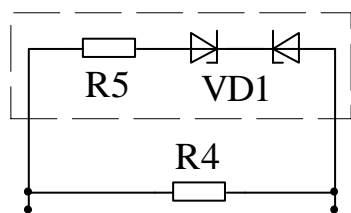


### Схемы устройств АРУ на основе стабилитрона

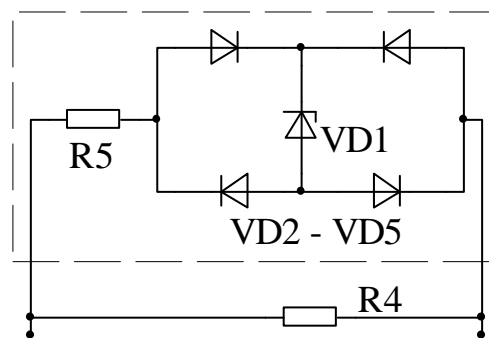
На рис. 14.5.а, в штриховом прямоугольнике, показана схема АРУ состоящая из двустороннего стабилитрона VD1 (на макете отсутствует, используют два встречно включенных стабилитрона) и резистора R5. Эта цепь включается в обратную связь НУ параллельно резистору R4 и работает следующим образом. При низком значении  $U_{\text{ВЫХ}}$  напряжение на выводах цепи менее напряжения пробоя стабилитронов  $|U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ПОС}}| < U_{\text{СТ}}$ , один из них находится в запертом состоянии и имеет высокое внутреннее сопротивление, следовательно, цепь не оказывает влияния на работу генератора. При достижении напряжением  $U_{\text{ВЫХ}}$  положительного порогового уровня, определяемого  $U_{\text{СТ}}$ , стабилитрон VD1 переходит в режим пробоя, стабилитрон VD2 находится в режиме открытого диода. При достижении  $U_{\text{ВЫХ}}$  отрицательного порогового уровня напряжения стабилитрон VD2 переходит в режим пробоя, а стабилитрон VD1 находится в режиме открытого диода. Следовательно, в том и другом случае, резистор R5 включается параллельно R4 и коэффициент усиления НУ уменьшается до значения

$$K_{\text{НУ}} = 1 + \frac{R4 \parallel R5}{R3} = 1 + \frac{R4}{R3} \cdot \frac{R5}{R4 + R5}$$

В результате устанавливается режим генерации, при котором автоматически выполняется условие  $\overline{K}_{\text{НУ}} = 3$ , причем НУ в насыщение не входит, нелинейные искажения  $U_{\text{ВЫХ}}$  существенно уменьшаются.



а)



б)

## Рис. 14.5. Схемы АРУ

а – с двусторонним стабилитроном, б – с выпрямительным мостом  
 Схема АРУ рис. 14.5.б с выпрямительным мостом на диодах VD2 ÷ VD5 и стабилитроном VD1 обеспечивает регулирование  $K_{\text{НУ}}$  аналогичным образом. При больших положительных  $U_{\text{ВЫХ}}$  стабилитрон VD1 переходит в режим пробоя при открытых диодах VD2 и VD4, а при больших отрицательных  $U_{\text{ВЫХ}}$  – при открытых диодах VD3 и VD5. Достоинство схемы – ее симметрия т.к. положительное и отрицательное ограничение обеспечивает один стабилитрон. В предыдущей схеме возможны дополнительные искажения сигнала за счет различия напряжений  $+U_{\text{СТ}} \neq -U_{\text{СТ}}$ .

Схемы рис. 14.5 позволяют не только снизить коэффициент гармоник  $U_{\text{ВЫХ}}$  до значения  $k_{\text{гар}} \approx 1\%$ , но и задать значение  $U_{\text{ВЫХ}}$  с погрешностью  $\delta_U \approx (5 \div 10)\%$  за счет выбора  $U_{\text{СТ}}$  и R5, а, также, стабилизировать амплитуду  $U_{\text{ВЫХ}}$  при изменениях напряжения питания и других влияющих факторов. Для построения генератора с лучшими характеристиками требуется применение более точной цепи АРУ [2].

## **Исследование характеристик и работы RC-генератора синусоидальных колебаний**

Цель работы – знание условий возникновения автоколебаний в замкнутом контуре, состоящем из операционного усилителя (ОУ) и цепи обратной связи; владение методами проектирования простейших RC-генераторов на основе ОУ и стабилизации амплитуды автоколебаний в RC-генераторах.

### ***Программа работы***

#### *Теоретические расчеты и построения*

1. Изучить принцип работы генератора.
2. Рассчитать сопротивления резисторов заданной RC-цепи (рис. 14.2) для частоты квазирезонанса генератора  $f_0$  и требуемое сопротивление резистора R3 в соответствии с вариантом задания из Таблицы 14.1.
3. Рассчитать сопротивление резистора R5 схемы АРУ.
4. Построить графики ожидаемых амплитудно-частотных характеристик RC-цепи и устройства, состоящего из последовательно соединенных усилителя и RC-цепи (рис. 14.6).
5. Построить график ожидаемой фазо-частотной характеристики (ФЧХ) RC-цепи.

#### *Исследование устройства, состоящего из усилителя и RC-цепи.*

1. Собрать усилитель и заданную RC-цепь с рассчитанными номиналами элементов согласно рис. 14.6.
2. Снять амплитудную характеристику усилителя.
3. Снять амплитудную характеристику усилителя с подключенной одной из цепей АРУ.
4. Снять АЧХ усилителя и всего устройства рис. 14.6.
5. Снять ФЧХ усилителя и всего устройства рис. 14.6.
6. Построить графики АХ и зависимостей коэффициентов усиления НУ в функции от входного сигнала без цепи и с цепью АРУ.

7. Построить графики АЧХ и ФЧХ усилителя и всего устройства рис. 14.6, проверить условия выполнения баланса амплитуд и фаз, определить ожидаемую частоту автоколебаний.

*Исследование работы RC-генератора.*

1. Собрать автоколебательный RC-генератор с замкнутыми контуром ПОС, проверить наличие сигнала на выходе генератора.
2. Изменяя сопротивление магазина сопротивлений обеспечить плавный запуск синусоидальных колебаний, измерить их частоту и амплитуду.
3. Исследовать влияние изменений напряжения питания на частоту, амплитуду и форму генерируемых колебаний.

*Исследование работы RC-генератора с цепью АРУ.*

1. Подключить к генератору цепь АРУ рис. 14.5а.
2. Экспериментально определить амплитуду и частоту колебаний генератора.
3. Исследовать влияние изменений напряжения питания на частоту, амплитуду и форму генерируемых колебаний.
4. Подключить к генератору цепь АРУ рис. 14.5б. и повторить исследования с ней.

## Методические указания по выполнению работы.

Таблица 14.1. Варианты заданий.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RC цепь	а	б	в	а	б	в	а	б	в	а	б	в	а
$f_0$ (кГц)	0,5	1	2	4	0,5	1	2	4	0,5	1	2	4	2
C (нФ)	8,2	15	3,9	1	15	2	8,2	2	3,9	8,2	15	3,9	2
R4 (кОм)	20	39	30	10	30	20	39	10	20	10	39	30	20

### Теоретические расчеты и построения

Сопротивления рассчитывают по формулам (14.5) и (14.8), используя приведенные в задании параметры генератора. Сопротивление резистора R5 схемы АРУ берут в диапазоне  $(3 \div 5)R4$ .

Для построения графиков АЧХ и ФЧХ используют формулы (14.6) и (14.7), считая, что коэффициент усиления НУ не зависит от частоты, а фазовый сдвиг отсутствует. Рассчитывают характеристики в частотном диапазоне от  $0,05f_0$  до  $20 f_0$ . На графиках по оси частот необходимо использовать десятичный логарифмический масштаб.

### Исследование устройства, состоящего из усилителя и RC-цепи.

Схема на рис. 14.6 представляет собой структуру с разомкнутой положительной ОС. Для построения НУ следует использовать ОУ повышенного быстродействия, например 140УД18, 140УД22.

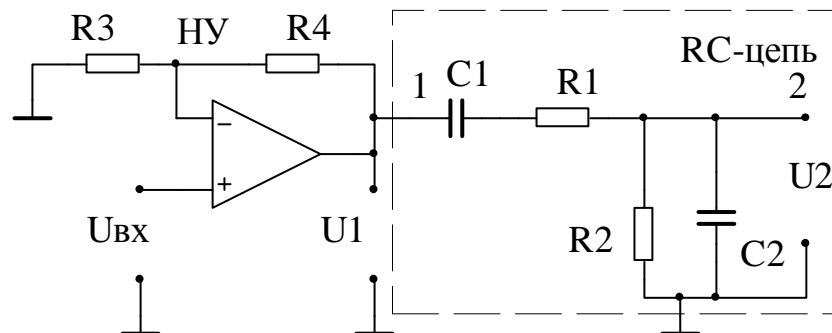


Рис. 14.6.

Схема используется для исследования основных характеристик генератора. На ее вход  $U_{вх}$  подают синусоидальное напряжение от внешнего генератора.

Дополнительно собирают схему АРУ, предусматривая возможность её подключения и отключения от одного из узлов, например инвертирующего входа ОУ. В устройствах АРУ приведенных на рис. 14.5. используют стабилизаторы VD1 типа КС156 и диоды VD2 – VD5 типа Д220.

Амплитудную характеристику усилителя  $U_1 = F(U_{вх})$  снимают на частоте  $f_0$  последовательно увеличивая амплитуду напряжения  $U_{вх}$  до значений при которых появятся значительные нелинейные искажения  $U_1$  (рис.14.4). Удобно при каждом значении  $U_{вх}$  измерять  $U_1$  с подключенной и отключенной схемой АРУ. Измерения проводят вольтметром, осциллограф используют только для визуального контроля сигналов. По результатам эксперимента на одних и тех же осях строят графики зависимостей  $U_1 = F(U_{вх})$  НУ с подключенной и отключенной схемой АРУ.

АЧХ и ФЧХ снимают в диапазоне от  $0,1 f_0$  до  $10 f_0$  на частотах (0,1; 0,2; 0,5; 0,8; 1; 1,2; 2; 5; 10)  $f_0$  с отключенной схемой АРУ. На частоте  $f_0$  задают такую амплитуду входного напряжения  $U_{вх}$ , чтобы на выходе НУ отсутствовали искажения напряжения  $U_1$ , что обеспечивается при амплитуде  $U_1$  в пределах 10В (контролируют осциллографом). В дальнейшем, амплитуду  $U_{вх}$  поддерживают постоянной на всех частотах, которые в ходе экспериментов последовательно уменьшают и увеличивают относительно  $f_0$ .

При снятии АЧХ вольтметром измеряют напряжения  $U_{вх}$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  и строят графики АЧХ для НУ и всего устройства в виде отношений  $U_1/U_{вх}$  и  $U_2/U_{вх}$  отражающих коэффициент передачи соответствующей цепи, используя по оси частот десятичный логарифмический масштаб.

При снятии ФЧХ измерение угла фазового сдвига  $\varphi$  осуществляют осциллографическим методом: один канал осциллографа подключен на вход НУ  $U_{вх}$ , а другой на его выход  $U_1$  или выход всего устройства  $U_2$ .

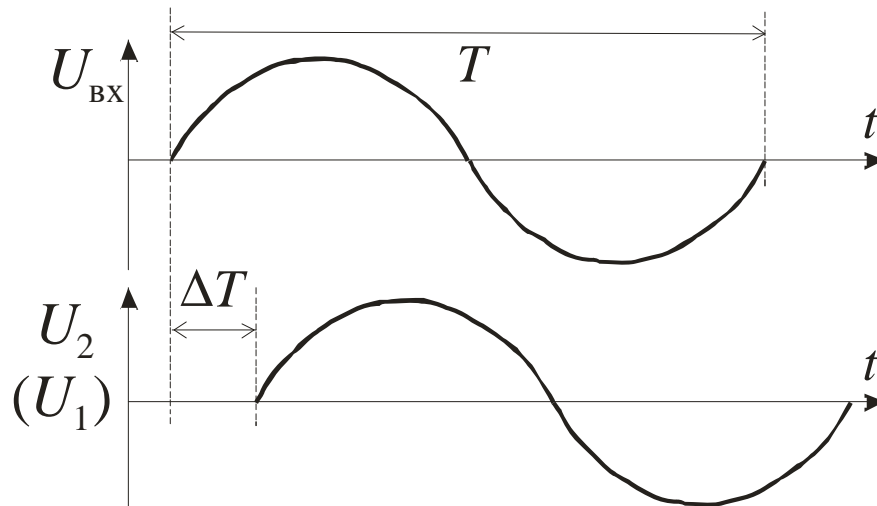


Рис. 14.7

По экрану осциллографа (рис. 14.7) измеряют значения периода напряжений  $T$  и временной интервал между ними  $\Delta T$ . Так как период  $T$  соответствует фазовому сдвигу  $360^\circ$ , а интервал  $\Delta T$  фазовому сдвигу  $\varphi$  между напряжениями, то значение  $\varphi$  определяется формулой

$$\varphi = \pm \frac{\Delta T}{T} \cdot 360^\circ$$

Временные интервалы входят в формулу в виде отношения, поэтому не обязательно определять их значения, достаточно взять их эквиваленты в миллиметрах.

В эксперименте необходимо задать синхронизацию осциллографа от входного напряжения  $U_{вх}$  и предварительно точно настроить нулевые уровни по вертикали обоих каналов осциллографа на середину экрана. При изменении частоты значительно уменьшается амплитуда напряжения  $U_2$ , что следует компенсировать увеличением чувствительности соответствующего канала осциллографа. Также следует правильно выбирать скорость развертки осциллографа в зависимости от частоты сигнала, чтобы на экране были видны 1 – 2 периода сигнала.

Фазовый сдвиг выходного сигнала отсчитывают от входного сигнала  $U_{вх}$  в пределах одной четверти его периода  $T$  ( $\pm 90^\circ$ ) с учетом того, что он может быть положительным и отрицательным. Если сигналы  $U_1$  и  $U_2$  переходят от

отрицательного к положительному значению раньше  $U_{вх}$ , то угол  $\varphi$  положительный, если наоборот, то отрицательный.

Расчетные и экспериментальные графики АЧХ и ФЧХ усилителя и всего устройства рис. 14.6 сравнивают и проверяют условия выполнения баланса амплитуд и фаз, определяют ожидаемую частоту автоколебаний.

### ***Исследование работы RC-генератора.***

Отключить внешний задающий генератор в устройстве рис. 14.6. Образовать автоколебательный RC-генератор путем замыкания контура положительной ОС, соединив выход 2 RC-цепи с неинвертирующим входом НУ (рис. 14.3). Для устойчивой работы генератора должно точно выполняться условие баланса амплитуд (14.3), а для возникновения колебаний петлевое усиление должно превышать единицу. Однако, в связи с тем, что действительное сопротивление резисторов на стенде отличается от указанного номинального значения, петлевое усиление на частоте  $f_0$  может оказаться меньше единицы, поэтому необходимо подобрать параметры генератора. Для этого в качестве  $R_3$  устанавливают постоянный резистор с сопротивлением примерно в полтора - два раза меньше расчетного, а последовательно с ним включают магазин сопротивлений, позволяющий менять суммарное сопротивление, следовательно, и петлевое усиление.

Устанавливают нулевое начальное сопротивление магазина и включают питание, после чего на выходе генератора  $U_{вых}$  должен появиться сигнал с большими искажениями. Увеличивая сопротивление магазина, устанавливают такое его значение, при котором наблюдается синусоидальный сигнал без визуально заметных нелинейных искажений. Точнее можно задать параметры генератора, если сначала добиться срыва автоколебаний, а потом восстановить их постепенным уменьшением сопротивления магазина, наблюдая процесс «раскачки» генератора.

Измерение амплитуды и частоты колебаний осуществляются осциллографическим методом, по соответствующим осям, предварительно проверив их ка-



либровку: малую ручку плавного регулирования усиления VAR и ручку плавного регулирования развертки SWR VAR фиксируют в крайнем положении CAL при их повороте до упора по часовой стрелке. Кнопка множителя развертки X10MAG *не* должна быть утоплена.

Частоту колебаний определяют по длительности периода или нескольких периодов, причем для уменьшения погрешности измерения следует максимально использовать ширину экрана.

Для исследования влияния изменений напряжения питания на частоту, амплитуду и форму генерируемых колебаний, напряжения уменьшают до значения  $\pm 10\text{В}$  и повторно определяют параметры напряжения  $U_{\text{вых}}$ . Если произошел срыв колебаний, то их восстанавливают подстройкой сопротивления магазина.

### *Исследование работы генератора с устройствами АРУ*

Устройство АРУ рис. 14.5а подключают параллельно резистору  $R_4$ , предварительно установив сопротивление  $R_5 = (3 \div 5)R_4$ , добиваются устойчивых синусоидальных колебаний на выходе генератора. Изменяя сопротивление магазина, устанавливают границы, в которых генератор работает, а  $U_{\text{вых}}$  не имеет заметных нелинейных искажений, и определяют параметры  $U_{\text{вых}}$  при крайних и среднем значениях сопротивлений. Далее сопротивлением магазина устанавливают амплитуду  $U_{\text{вых}}$  порядка  $(5 \div 6)\text{В}$ , измеряют его параметры и уменьшают напряжения питания до значения  $\pm 10\text{В}$  и повторно определяют параметры  $U_{\text{вых}}$ .

Для устройства АРУ рис. 14.5б проводят те же эксперименты.

### *Оценка полученных результатов*

Оценивают: соответствие экспериментально снятых характеристик расчетным характеристикам, соответствие частота генерации заданной частоте, влияние напряжения питания на параметры генерируемого сигнала без устройства АРУ и при его наличии.

### Литература

1. Балтруков Н.Н., Кочетков Ю.Д. Электротехника и электроника. Ч.2.: Учебное пособие. СПб.: Факультет технической кибернетики СПбГПУ, 2011. 135 с.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Т.1, Т.2: Пер. с нем. М.: ДМК Пресс, 2008. 809 с.
3. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. 2-е изд., перераб. и доп. Энергоатомиздат, 1988. 304 с.
4. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2005, 528 с.