

АПЕРИОДИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ.  
ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩАЯ И ИНТЕГРИРУЮЩАЯ ЦЕПИ

Цель работы - экспериментальное исследование передаточной функции и импульсной характеристики аperiodического усилителя, изучение прохождения импульсных сигналов через аperiodический усилитель, дифференцирующую и интегрирующую цепи; изучение влияния отрицательной обратной связи на параметры линейных цепей.

Вводные замечания

Схемы исследуемого аperiodического усилителя, дифференцирующего и интегрирующего звеньев приведены на рис. I, а, б, в соответственно.

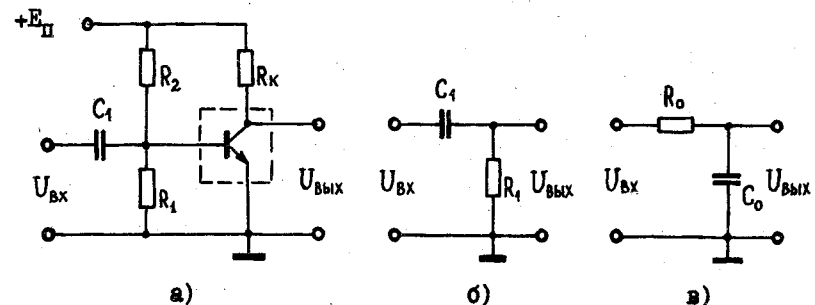


Рис. I

Одной из основных радиотехнических задач является исследование прохождения сигналов через линейные цепи. При этом часто используется либо спектральный, либо временной метод анализа прохождения сигналов.

При спектральном методе анализа сигналы представляются суммой гармонических составляющих. Исчерпывающей характеристикой сигналов в этом случае является спектр комплексных амплитуд  $\dot{A}(n\omega)$  или спектральная плотность  $S(\omega)$ . В свою очередь, линейная цепь определяется передаточной функцией  $K(j\omega) = K(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$ , показывающей, как изменяется комплексная амплитуда  $\dot{U}_{вх}(\omega)$  входного сигнала при прохождении через линейную цепь:

$$\dot{U}_{вых}(\omega) = K(\omega) e^{j\varphi_K(\omega)} \dot{U}_{вх}(\omega).$$

Модуль  $K(\omega)$  передаточной функции называется амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), аргумент  $\varphi_k(\omega)$  - фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) линейной цепи.

Коэффициенты передачи  $K_g(j\omega)$  и  $K_u(j\omega)$  дифференцирующего и интегрирующего звеньев, представленных на рис. 1,б и 1,в соответственно, определяются соотношениями:

$$K_g(j\omega) = \frac{j\omega\tau_g}{1+j\omega\tau_g},$$

$$K_u(j\omega) = \frac{1}{1+j\omega\tau_u},$$

где  $\tau_g = R_1 C_1$ ,  $\tau_u = R_0 C_0$ .

Звенья, показанные на рис. 1,б,в, можно назвать дифференцирующим и интегрирующим лишь условно. Эти звенья будут дифференцировать и интегрировать подаваемый на вход сигнал, если его спектр расположен на определенном участке АЧХ звеньев (рис. 1,б,в).

В противном случае дифференцирования и интегрирования не будет.

Как именно должен быть расположен спектр, и исследуется экспериментально в настоящей работе.

Передаточная функция аperiodического усилителя (см. рис.1,а) может быть представлена

$$K(j\omega) = - \frac{K_0 \cdot j\omega\tau_p}{(1 + \omega\tau_p)(1 + j\omega\tau_0)},$$

где  $\tau_p$  - постоянная времени разделительной цепочки;  $\tau_0$  - постоянная времени нагрузочной цепи. Эти постоянные:

$$\tau_p = C_1 R_1 \parallel R_2 \parallel r_{\bar{e}}, \quad \tau_0 = C_0 R_K \parallel \frac{1}{h_{22}},$$

где  $r_{\bar{e}} = h_{11}$  - сопротивление участка база - эмиттер активного элемента;  $1/h_{22}$  - выходное сопротивление активного элемента; емкость  $C_0$  - сумма межэлектродной емкости  $C_{кз}$  и монтажной емкости  $C_m$ .

Постоянная

$$K_0 = \beta \cdot R_K \parallel \frac{1}{h_{22}} = \frac{\beta}{h_{11}} \cdot R_K \parallel \frac{1}{h_{22}}$$

определяет усиление схемы на "средних" частотах, когда влиянием емкостей  $C_0$  и  $C_1$  можно пренебречь.

Если  $\tau_0/\tau_p \ll 1$ , то

$$K(j\omega) = - \frac{K_0}{1 + j(\omega\tau_0 - \frac{1}{\omega\tau_p})}$$

В лабораторном макете аperiodический усилитель выполнен на современной элементной базе. Упрощенная схема усилителя приведена на рис. 2. Роль активного элемента выполняет операционный усилитель I40 УДИА. Исследуемый сигнал может быть подан либо на вход 1 (усилитель с закрытым входом), либо на вход 2 (усилитель с открытым входом).

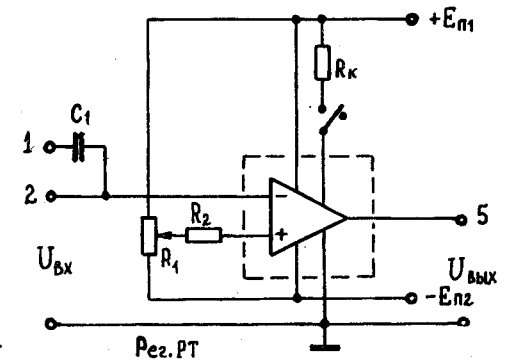


Рис. 2

При временном методе анализа прохождения сигналов через линейные цепи сигналов представляется совокупностью вписанных бесконечно коротких, плотно примыкающих друг к другу импульсов. Четырехполосник определяется импульсной характеристикой  $\varphi(t)$  (откликом на  $\delta$ -функцию) или переходной характеристикой  $h(t)$  (откликом на единичную функцию). Переходная характеристика дифференцирующего звена (см. рис. 1,б); импульсные характеристики интегрирующего звена (см. рис. 1,в) и аperiodического усилителя (см. рис. 1,а) имеют вид [1]:

$$h_g(t) = e^{-t/\tau_g}, \quad \forall t \geq 0;$$

$$g_u(t) = \frac{1}{\tau_u} e^{-t/\tau_u}, \quad \forall t \geq 0;$$

$$\varphi_y(t) = - \frac{K_0}{\tau_0} (e^{-t/\tau_0} - \frac{\tau_0}{\tau_p} e^{-t/\tau_p}), \quad \forall t \geq 0.$$

В работе исследуется влияние отрицательной обратной связи на параметры линейных четырехполосников. Экспериментальное исследование проводится на примере последовательной отрицательной обратной связи по напряжению в аperiodическом усилителе. Структурная схема такого усилителя показана на рис. 3.

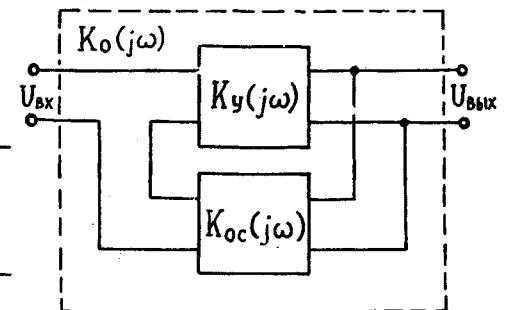


Рис. 3

Передающая функция  $K_o(i\omega)$  усилителя с ОС определяется соотношением [Л]

$$K_o(i\omega) = \frac{K_y(i\omega)}{1 - K_y(i\omega)K_{oc}(i\omega)},$$

$K_y(i\omega)$  и  $K_{oc}(i\omega)$  — передаточные функции исходного усилителя и четырехполюсника ОС соответственно. Обратная связь будет отрицательной, если

$$K_y(i\omega)K_{oc}(i\omega) = -|K_y(i\omega)K_{oc}(i\omega)| = -K_y(\omega)K_{oc}(\omega).$$

Отрицательная обратная связь (ООС) влияет на многие параметры усилителя. В частности, нестабильность коэффициента усиления  $\frac{\Delta K_o}{K_o}$  четырехполюсника, охваченного ООС, обусловленная нестабильностью усиления  $\Delta K_y/K_y$  исходного усилителя, уменьшается в  $(1 + K_y K_{oc})$  раз. Другой пример: нижняя граничная частота  $\omega_n = 1/\tau_n$  при введении ООС уменьшается в  $(1 + K_y K_{oc})$  раз, а верхняя граничная частота  $\omega_b = 1/\omega_b$  увеличивается во столько же раз.

#### Порядок выполнения работы

1. Получить у преподавателя задание.
2. Прежде чем приступить к выполнению задания, ознакомьтесь с общими указаниями (с. 3) и с описанием макета.

#### Перечень и содержание заданий

1. Исследовать влияние величины сопротивления нагрузки на амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилителя и на форму выходного импульсного сигнала:

- а) снять АЧХ усилителей при двух значениях нагрузки  $R_{н1}$  и  $R_{н2}$ ;
- б) снять импульсные характеристики, измерить постоянные времени характеристик и по ним определить верхние границы полос пропускания усилителей с нагрузками  $R_{н1}$  и  $R_{н2}$ ;
- в) оценить влияние величины сопротивления нагрузки на форму выходного сигнала при двух различных длительностях входного импульса.

Примечание. При выполнении заданий по п. 1 использовать усилитель с "открытым входом" (без разделительной цепи на входе).

2. Исследовать влияние разделительной цепи на входе усилителя на АЧХ усилителя и на форму выходного импульсного сигнала:

а) снять АЧХ усилителей: при наличии разделительной цепи и без разделительной цепи;

б) снять импульсные характеристики, измерить постоянные времени усилителей при наличии разделительной цепи и без разделительной цепи;

в) оценить влияние разделительной цепи на форму выходного импульсного сигнала при двух различных длительностях входного импульса; сравнить формы выходных импульсов усилителей при наличии и при отсутствии разделительной цепи.

Примечание. При выполнении заданий использовать усилитель с нагрузкой  $R_{н2}$ .

3. Исследовать влияние ООС на характеристики усилителя и на форму выходного импульсного сигнала:

- а) снять АЧХ усилителей с одной нагрузкой ( $R_{н1}$  или  $R_{н2}$ ) при отсутствии ООС, при слабой ООС, при сильной ООС; на основании полученных данных определить величины факторов и коэффициентов ООС;
- б) снять импульсные характеристики с одной нагрузкой ( $R_{н1}$  или  $R_{н2}$ ), измерить постоянные времени и по ним определить верхние границы полос пропускания усилителей: при отсутствии ООС, при слабой ООС, при сильной ООС;
- в) исследовать влияние ООС на повышение стабильности коэффициента усиления с одной нагрузкой ( $R_{н1}$  или  $R_{н2}$ );
- г) измерить длительности фронтов и амплитуды импульсов на выходе усилителей: при отсутствии ООС, при слабой ООС, при сильной ООС; на основании полученных данных определить величины факторов ООС; сопоставить изменение длительностей фронтов выходных импульсов с изменением величин факторов ООС.

4. Исследовать пассивные дифференцирующую и интегрирующую цепи:

- а) снять АЧХ и переходную характеристику дифференцирующей цепи;
- б) снять АЧХ и импульсную характеристику интегрирующей цепи;
- в) исследовать влияние взаимного расположения спектра импульсного сигнала и АЧХ дифференцирующей цепи на качество дифференцирования;
- г) исследовать влияние взаимного расположения спектра импульсного сигнала и АЧХ интегрирующей цепи на качество интегрирования.

**Варианты заданий:**

- № 1 - 1а, 2б, 4а, 4г, 3г, 3в.
- № 2 - 2а, 1б, 4б, 4в, 3г, 3в.
- № 3 - 2б, 1в, 4а, 4г, 3а, 3г.
- № 4 - 1б, 2в, 4б, 4в, 3а, 3г.
- № 5 - 1а, 2б, 4а, 4г, 3б, 3г.
- № 6 - 2а, 1б, 4б, 4в, 3б, 3г.

Методические указания по выполнению заданий

Установка линейного режима работы усилителя

Усилитель (см. рис. 2) должен работать в линейном режиме, т.е. усиливать сигнал без искажения его формы. Для этого необходимо, чтобы амплитуда входного сигнала была мала и не превышала максимально допустимую амплитуду  $U_{вх, max}$ , в противном случае произойдет искажение выходного сигнала - ограничение "сверху" или "снизу". Значение  $U_{вх, max}$  составляет 10-20 мВ при отсутствии ООС, при слабой ООС  $U_{вх, max}$  - не более 0,2 В, при сильной ООС  $U_{вх, max}$  - не более 1 В. В макете можно незначительно увеличить  $U_{вх, max}$ , регулируя с помощью потенциометра  $R_1$  ("Рег. РТ") напряжение смещения усилителя.

Снятие АЧХ усилителя

Для снятия АЧХ усилителя необходимо:

а) собрать лабораторную установку по рис. 4. Клеммы 1 - закрытый вход усилителя, клеммы 2 - открытый вход, клеммы 5 - выход усилителя. Требуемая нагрузка  $R_{н1}$  или  $R_{н2}$  включается с помощью переключателя П. Для включения ООС необходимо соединить перемычкой выход усилителя со входом соответствующего четырехполосника обратной связи. При соединении клемм 3 и 5 включается слабая ООС ( $K_{ос1}$ ), а при соединении клемм 4 и 5 - сильная ООС ( $K_{ос2}$ );

б) установить линейный режим работы усилителя при частоте входного сигнала  $f = 1$  кГц и максимально возможной амплитуде. Контроль проводится по осциллографу;

в) снять зависимость  $U_{вых}(f)$ , контролируя постоянство амплитуды входного сигнала по осциллографу и измеряя выходное напряжение вольтметром. Частоту  $f$  изменять от 20 кГц до значения частоты, при котором  $U_{вых}$  достигает уровня  $\approx 0,2 U_{вх, max}$ .

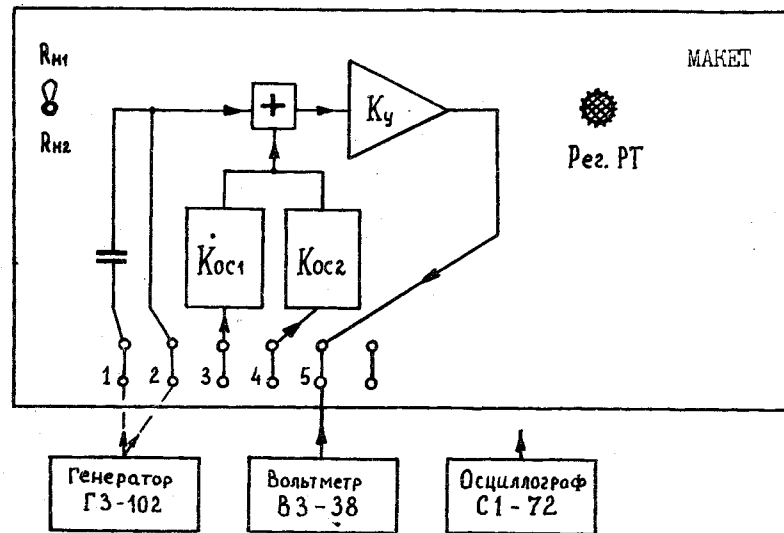


Рис. 4

Рекомендуется устанавливать значения частот  $f = 20, 50, 100, 200, 500$  Гц; 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 кГц. На участках заметного изменения  $U_{вых}(f)$  частоты выбирать с меньшим шагом. Результаты измерения занести в табл. 1 и 2.

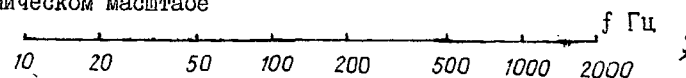
Таблица 1  
Условие  $U_{вх} = 5$  мВ

		$f$ , Гц	20	50
$R_{н1}$	$U_{вых}$ , В			
	$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$			

Таблица 2  
Условие  $U_{вх} = 0,1$  В

		$f$ , Гц	20	50
$K_{ос1}$	$U_{вых}$ , В			
	$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$			

г) построить АЧХ. На графике  $K(f)$  значения  $f$  откладывать в логарифмическом масштабе



д) отметить граничные частоты  $f_H$  и  $f_B$  полосы пропускания на уровне  $0,7 K_{max}$ .

### Снятие импульсной характеристики усилителя

Для снятия импульсной характеристики (2.7...2.8) необходимо:

а) собрать лабораторную установку по рис. 5;

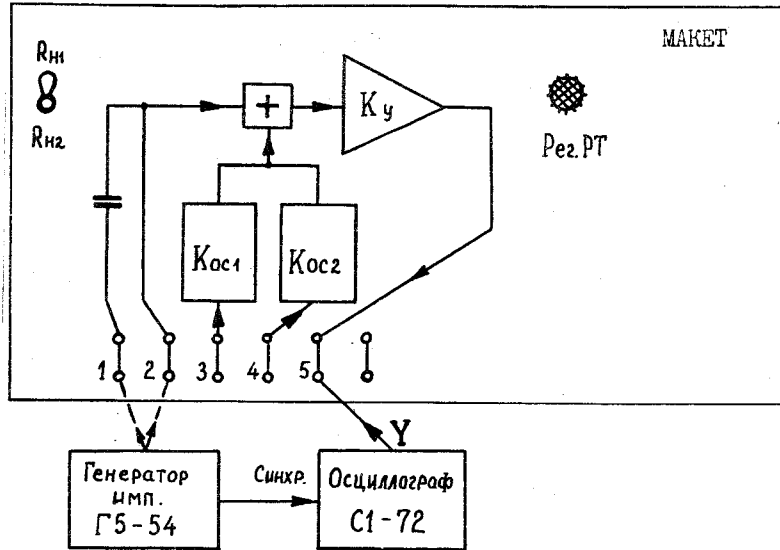


Рис. 5

б) установить параметры входного импульса, имитирующего  $\delta$ -функцию:

полярность - отрицательная;

длительность  $\tau_u = 0,1 \dots 0,3$  мкс;

амплитуда  $E_0$  - максимально возможная, но такая, чтобы не было ограничения "сверху" выходного сигнала; ориентировочно  $E_0 = 1 \dots 10$  В.

Частоту повторения  $F$  установить такой, чтобы к приходу очередного импульса переходные процессы от предыдущего импульса закончились; ориентировочно  $F = 0,5 \dots 2$  кГц;

в) выбрать развертку осциллографа так, чтобы наблюдать на экране отклик только на один импульс и зарисовать в одном масштабе времени входной импульс и выходной отклик (импульсную характеристику  $g(t)$ );

г) измерить постоянную времени  $\tau_n$  импульсной характеристики с помощью осциллографа, учитывая, что

$$g(t) = g_{max} e^{-t/\tau_n},$$

изменяется за время  $\tau_n$  от  $g_{max}$  до  $g_{max} e^{-1} \approx 0,37 g_{max}$

### Наблюдение формы импульсных сигналов на выходе усилителя

Для наблюдения импульсных сигналов:

а) собрать лабораторную установку по рис. 5;

б) провести опыты по наблюдению импульсов на выходе усилителя, используя входные импульсы отрицательной полярности. Опыт провести для двух значений длительности импульсов:  $\tau_{u1} = 100 \dots 300$  мкс и  $\tau_{u2} = 700 \dots 1000$  мкс при скважности импульсов  $g = T/\tau_u = 3 \dots 5$ ,  $T$  - период повторения.

Амплитуду импульсов выбрать самостоятельно такую, чтобы она удовлетворяла требованиям линейного режима работы усилителя. Использовать: выход -

"1:10" для усилителя со слабой ОСС, выход "x 0,3" для усилителя с сильной ОСС;

в) зарисовать (в одном масштабе времени) входной и выходной импульсы, измерить длительность фронта  $\tau_\phi$  и спада  $\Delta U$  плоской части выходного импульса с помощью осциллографа (рис. 6).

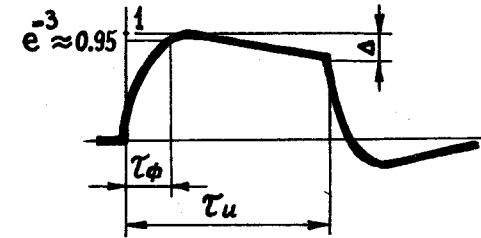


Рис. 6

### Определение коэффициента $K_{ос}$ и фактора $K_\phi$ ОСС

Из формулы

$$K_o = \frac{K_y}{1 + K_{ос} K_y},$$

где  $K_y$  - коэффициент усиления усилителя на средних частотах, без ОСС;

$K_o$  - коэффициент усиления при наличии ОСС, величина фактора ОСС  $K_\phi = 1 + K_y K_{ос} = K_y / K_o$ ,

а коэффициент ОСС  $K_{ос} = \frac{K_\phi - 1}{K_y}$ .

Для того чтобы определить  $K_{\varphi}$  и  $K_{ос}$ , необходимо измерить  $K_y$  и  $K_o$ . При измерении  $K_y$  и  $K_o$  в качестве входного сигнала можно использовать как синусоидальное колебание с частотой  $f = 0,5 \dots 1$  кГц (см. рис. 4), так и импульсный сигнал длительностью  $\tau_u = 1$  мс (см. рис. 5). Измерения входного и выходного напряжений проверить: вольтметром при использовании синусоидального колебания, по осциллографу - при импульсном сигнале. При проведении опытов обеспечить линейный режим работы усилителей.

### Исследование влияния ООС на стабильность коэффициента усиления $K_y$

Нестабильность коэффициента усиления имитируется изменением сопротивления нагрузки.

Опыты проводились при синусоидальном входном сигнале с частотой  $f = 0,5 \dots 1$  кГц (см. рис. 4), при этом обеспечивался линейный режим работы усилителей.

Измерить  $K_{y1}$  и  $K_{y2}$  ( $K_{y1}$  - коэффициент усиления усилителя при нагрузке  $R_{н1}$ ,  $K_{y2}$  - при  $R_{н2}$ ), вычислить отношение  $K_{y1}/K_{y2}$  для трех режимов работы усилителей: без ООС, со слабой ООС, с сильной ООС.

Объяснить полученные результаты.

### Снятие АЧХ дифференцирующей и интегрирующей цепей

Для снятия АЧХ используется лабораторная установка рис. 7. При проведении опытов поддерживать амплитуду входного сигнала постоянной и равной  $U_{вх} = 5 \dots 10$  В, контроль проводить с помощью осциллографа.

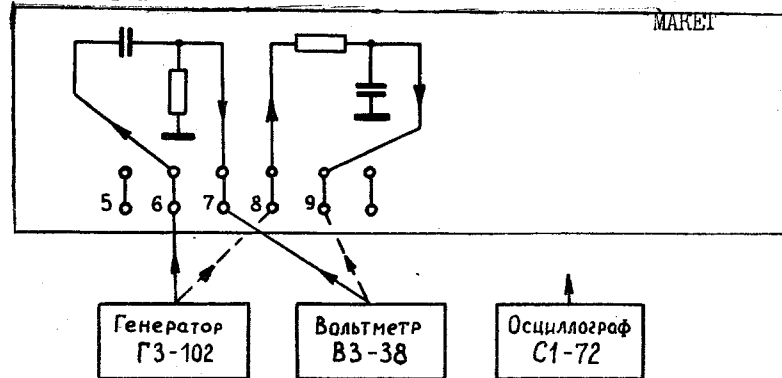


Рис. 7.

Для дифференцирующей цепи частоту входного сигнала изменять от 20 Гц до значения частоты, при котором выходное напряжение достигает максимальной величины и перестает зависеть от частоты. Шаг изменения частоты выбрать самостоятельно, количество точек - 10...12.

Для интегрирующей цепи частоту входного сигнала изменять от 20 Гц до значения частоты, при котором напряжение на выходе уменьшается до уровня  $\approx 0,2 U_{max}$ . Шаг изменения частоты выбрать самостоятельно, количество точек 15...20.

Построить график АЧХ  $K(f)$  в линейном масштабе.

### Наблюдение формы импульсных сигналов на выходе дифференцирующей и интегрирующей цепей

Для проведения исследований необходимо собрать лабораторную установку по рис. 8. Использовать импульсы положительной полярности с амплитудой  $E_0 = 0,5 \dots 10$  В.

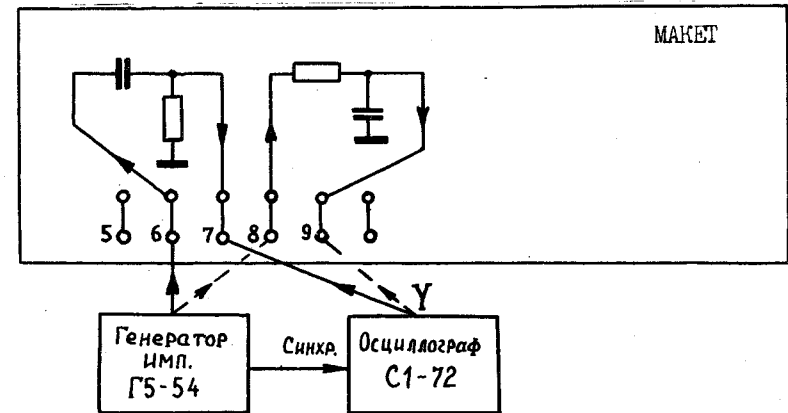


Рис. 8

Переходная характеристика  $h_g(t)$  дифференцирующей цепи. Отклик цепи на скачок напряжения по форме совпадает с  $h_g(t)$ . В качестве сигнала, имитирующего скачок напряжения, можно использовать длинный импульс ( $\tau_u = 1$  мс,  $F_{повт} = 200 \dots 400$  В). Подобрать скорость развертки осциллографа такую, чтобы было удобно измерить постоянную времени  $\tau_g$  переходной характеристики  $h_g(t)$ . Зарисовать (в одном масштабе времени) входной скачок напряжения и вид отклика, измерить постоянную времени  $\tau_g$ .

Импульсная характеристика  $\varphi(t)$  интегрирующей цепи. В качестве импульса, имитирующего  $\delta$ -функцию, использовать короткий импульс ( $\tau_{\text{и}} = 0,1 \dots 0,3$  мкс,  $F_{\text{повт}} = 0,1 \dots 1$  кГц). На экране осциллографа наблюдать отклик только на один импульс, так чтобы было удобно измерить постоянную времени  $\tau_{\text{инт}}$  импульсной характеристики  $\varphi(t)$ . Зарисовать входной импульс и вид отклика, измерив  $\tau_{\text{инт}}$  с помощью осциллографа.

Дифференцирование и интегрирование сигналов. Влияние взаимного расположения АЧХ цепи и спектра сигнала на качество дифференцирования (интегрирования) сигналов изучается на примере прохождения периодической последовательности импульсов через дифференцирующую (интегрирующую) цепь (см. рис. 8). При скважности  $q \geq 3$  подобрать такую длительность входных импульсов, чтобы в исследуемой цепи осуществлялось эффективное дифференцирование (интегрирование).

Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов и их спектры. Схему исследования – соединение генератора импульсных сигналов, осциллографа и анализатора спектра – выбрать самостоятельно.

Повторить опыт, подобрав так длительность входных импульсов, чтобы дифференцирования (интегрирования) не наблюдалось. Сделать выводы.