

**Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

**Кафедра вычислительных машин, систем и сетей**

*Лабораторная работа № 01*

**Прохождение сигналов через  $RC$ -цепи**

## Содержание

1.	Цель работы.....	3
2.	Описание лабораторной установки.....	4
3.	Подготовка к работе.....	6
4.	Рабочее задание.....	8
	Исследование частотных характеристик RC-цепей .....	8
	Исследование импульсных характеристик RC-цепей.....	9
5.	Оформление отчета о выполненной работе.....	10
6.	Методические указания.....	11
7.	Основные сведения .....	12
8.	Контрольные вопросы и задачи.....	18
9.	Литература .....	19

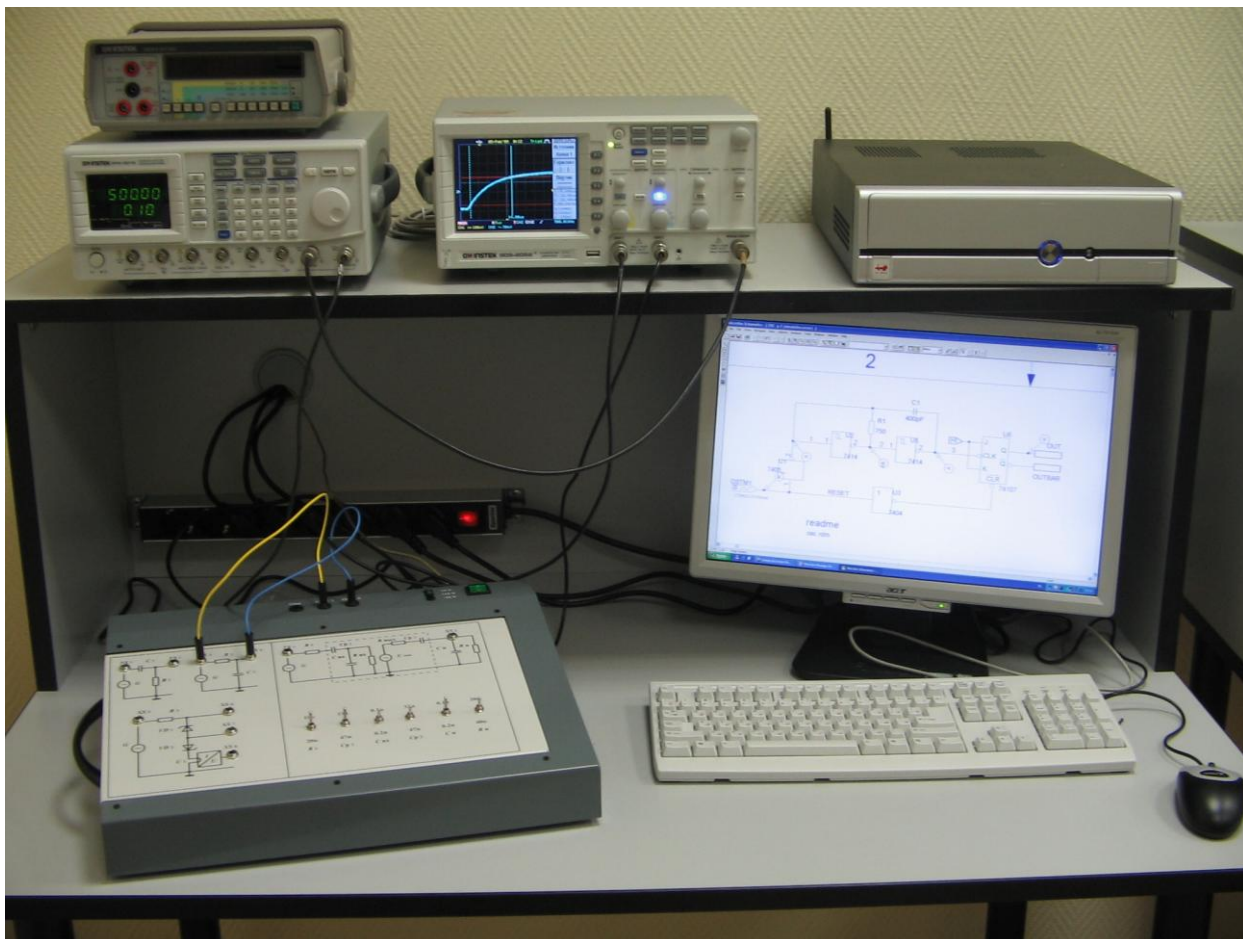
### ***1. Цель работы***

Цель работы – экспериментальное исследование  $RC$ -цепей первого порядка, выполняющих функции простейших низкочастотных и высокочастотных фильтров и применяемых в электронных устройствах в качестве элементов связи. Проводится сравнение экспериментальных частотных и переходных характеристик  $RC$ -цепей с теоретическими характеристиками, определяются параметры цепей.

Другая цель – это приобретение и закрепление навыков работы с запоминающим цифровым двухканальным осциллографом GDS-2062 [1] и генератором сигналов специальной формы GFG-3015 [2], т.е. с теми приборами, с которыми студент будет работать на протяжении всего практического курса изучения электроники.

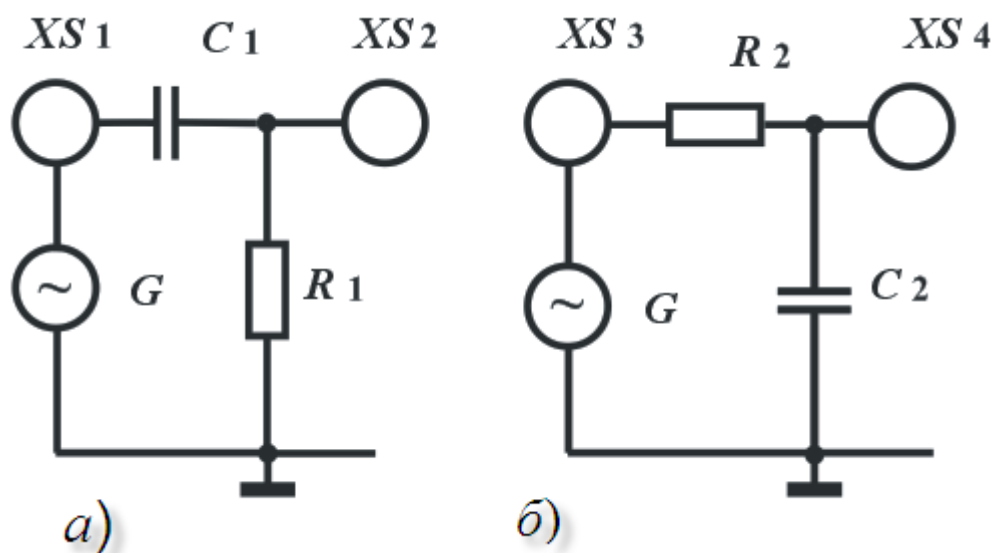
## 2. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает запоминающий цифровой двухканальный осциллограф GDS-2062, генератор сигналов специальной формы GFG-3015 и лабораторный пульт со съемной передней панелью.



В пульт встроены источники питания (+5В,  $\pm 15$ В), необходимые для выполнения всех лабораторных работ, понижающий сетевой трансформатор, выходное напряжение которого в некоторых работах используется для формирования задающего сигнала при снятии вольтамперных характеристик. Сменная панель лабораторной работы (рис. 1) включает две схемы:

- схема 1 –  $RC$ -цепь, являющаяся фильтром верхних частот (рис. 1,а);
- схема 2 –  $RC$ -цепь, являющаяся фильтром нижних частот (рис. 1,б);



**Рис. 1. Лицевая панель лабораторной установки**

Для схем (рис. 1, *a* и *б*) с помощью генератора, который подключен к схемам внутри стенда, и осциллографа снимаются амплитудно-частотные и переходные характеристики.

### 3. Подготовка к работе

3.1. Ознакомиться с описанием осциллографа GDS-2062 [1] и генератора сигналов GFG-3015 [2] и методами измерений напряжения и временных интервалов.

3.2. Для схем (рис. 1,а и б) получить выражение для амплитудно-частотной  $H(f) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(f)}{U_{\text{ВХ}}(f)}$  и переходной  $h(t) = \frac{u_{\text{ВЫХ}}(t)}{u_{\text{ВХ}}(t)}$  характеристик.

Построить данные зависимости и показать, как по графикам определить:

- для схемы рис. 1,а – нижнюю граничную частоту ( $f_n$ ) и спад плоской вершины ( $\delta u$ ) при фиксированной длительности импульса  $t_{\text{и}}$ ;
- для схемы рис. 1,б – верхнюю граничную частоту ( $f_v$ ) и фронт выходного импульса ( $t_{\text{ф}}$ ).

Параметры элементов схемы приведены в таблице 1.

При расчете АЧХ коэффициент передачи рассчитать на частотах 46, 100, 220, 460 Гц, 1, 2.2, 4.6, 10, 22, 100 и 220 кГц, а график построить в двойном логарифмическом масштабе (см. раздел 6 «Основные сведения»).

При расчете спада плоской вершины считать, что длительность входного импульса  $t_{\text{и}}=30\text{мкс}$ .

Номер варианта соответствует порядковому номеру студента в учебном журнале.

Таблица 1

## Варианты заданий

Вар.№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Схема а)	$R_1$ , кОм	15	30	20	10	3	2	1	3,9	6,2	100
	$C_1$ , нФ	20	10	15	30	100	150	300	75	51	3
Схема б)	$R_2$ , кОм	1	3,3	5	10	20	0,1	0,2	0,33	0,5	0,75
	$C_2$ , нФ	10	3	2	1	0,51	100	51	30	20	15

Вар.№		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Схема а)	$R_1$ , кОм	30	62	39	20	6,2	3,9	2	7,5	12	200
	$C_1$ , нФ	10	5,1	7,5	15	51	75	150	39	27	1,5
Схема б)	$R_2$ , кОм	2	6,8	10	20	39	0,2	0,39	0,68	1	1,5
	$C_2$ , нФ	5,1	1,5	1	0,51	0,24	51	27	15	10	7,5

Вар.№		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Схема а)	$R_1$ , кОм	7,5	15	10	5,1	1,5	1	0,51	2	3	51
	$C_1$ , нФ	39	20	30	62	200	300	620	150	100	6,2
Схема б)	$R_2$ , кОм	0,51	1,5	2,7	5,1	10	0,051	0,1	0,15	0,24	0,39
	$C_2$ , нФ	20	6,2	3,9	2	1	200	100	68	39	30

#### 4. Рабочее задание

##### Исследование частотных характеристик RC-цепей

1. Снять амплитудно-частотную характеристику RC-цепи с разделительным конденсатором (рис. 1,а).

$f$ , кГц	0,046	0,100	0,220	0,460	1,0	2,2	4,6	10	22	46	100	220
$2U_{BX}$ , В												
$2U_{ВЫХ}$ , В												
$\gamma = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$												
$L\gamma$ , дБ												

По построенной характеристике определить граничную частоту  $f_B$ .

Верхняя граничная частота  $f_B = \underline{\hspace{2cm}}$  кГц.

2. Снять амплитудно-частотную характеристику RC-цепи с интегрирующим конденсатором (рис. 1,б).

$f$ , кГц	0,046	0,100	0,220	0,460	1,0	2,2	4,6	10	22	46	100	220
$2U_{Г}$ , В												
$2U_{ВЫХ}$ , В												
$\gamma = U_{ВЫХ} / U_{ВХ}$												
$L\gamma$ , дБ												

По построенной характеристике определить граничную частоту  $f_H$ .

Нижняя граничная частота  $f_B = \underline{\hspace{2cm}}$  Гц.

*Результаты этой части работы оформить в виде таблиц и графиков.*



### Исследование импульсных характеристик RC-цепей

1. Снять переходную характеристику RC-цепи с интегрирующим конденсатором (рис. 1,б). Определить длительность фронта  $t_f$  и среза  $t_c$  при длительности входного сигнала 100мкс.
2. Снять переходную характеристику RC-цепи с разделительным конденсатором (рис. 1,а). Для выходного импульса (при длительности входного импульса 30мкс) определить амплитуду  $U_m$  и спад плоской вершины  $\Delta U$ . По этим данным рассчитать относительный спад плоской вершины  $\delta U$ .
3. Исследовать дифференцирующую RC-цепь (рис. 1,а). Для этого увеличить длительность входного сигнала до 2 мс. Снять временные осциллограммы входного и выходного сигналов. По уровню 0,5 определить длительности положительного и отрицательного импульсов выходного сигнала. Провести теоретический расчет длительности импульсов, исходя из параметров схемы, и сравнить с экспериментом.

*Результаты п.п. 1 и 2 представить в виде осциллограмм с указанием осей, дополнительных построений и сводной таблицы.*

*Результаты п.3 представить в виде осциллограмм с указанием осей, дополнительных построений и результатов расчета.*

Схема	RC-цепь с интегрирующим конденсатором (рис.1,б)		RC-цепь с разделительным конденсатором (рис.1,а)	
Параметр	$f_{в}$ , кГц	$t_f$ , мкс	$f_{н}$ , кГц	$\delta$ , %
Расчет				
Эксперимент				

## **5. Оформление отчета о выполненной работе**

Отчет может быть выполнен как в рукописном виде на стандартных листах А4, так и его можно напечатать с использованием вычислительной техники. Не допускается ксерокопирование отчета.

Оформленный отчет должен содержать:

- Титульный лист или заголовок, включающий название лабораторной работы, фамилию студента и дату выполнения работы.
- Все пункты подготовки к работе, включая схемы, расчеты, графики.
- Все выполненные пункты рабочего задания, включая принципиальные схемы исследуемых цепей, результаты измерений, а также осциллограммы, диаграммы, графики с указанием осей, масштаба, всеми дополнительными построениями и расчетами.
- Сравнение данных, полученных при подготовке к работе и результатов, полученных в процессе выполнения работы.

## 6. Методические указания

1. При снятии амплитудно-частотной характеристики (п.п. 1 и 2 рабочего задания) амплитуда синусоидального входного напряжения устанавливается равной 1В и поддерживается постоянной во всем частотном диапазоне.
2. Для снятия и построения АЧХ рекомендуется воспользоваться программой АСН, которая позволяет не только снимать данные, но и визуально отражать характеристику в двойном логарифмическом масштабе. Данные и характеристику впоследствии можно перенести в отчет.
3. Нижняя  $f_n$  и верхняя  $f_v$  граничные частоты определяется по амплитудно-частотной характеристике в точках, где модуль коэффициента передачи уменьшается в 1,41 раз, что эквивалентно уменьшению логарифмического коэффициента передачи на 3 дБ.
4. При исследовании переходных характеристик снимаются осциллограммы выходных напряжений при воздействии на входе импульсного сигнала. При амплитуде входного сигнала 1В осциллограмма выходного напряжения и определяет переходную характеристику  $h(t)$  цепи.
5. Длительность фронта  $t_\phi$  определяется интервалом времени между уровнями 0,1 и 0,9 при нарастании импульса. Длительность среза  $t_c$  определяется интервалом времени между уровнями 0,9 и 0,1 при срезе импульса. Эти временные параметры следует определять с помощью курсоров осциллографа.
6. Длительность фронта  $t_\phi$  и среза  $t_c$  связаны с постоянной времени  $RC$ -цепи соотношением  $t_\phi = t_c = 2,2\tau$ .
7. Относительный спад плоской вершины определяется как отношение абсолютного спада за время импульса к амплитуде сигнала (рис. 8). Относительный спад плоской вершины  $\delta u$  и постоянная времени цепи  $\tau$  связаны между собой формулой 
$$\delta u = \frac{\Delta u}{U_M} 100\% = \frac{t_{BX}}{\tau} 100\%.$$

## 7. Основные сведения

В электронике RC-цепи применяются часто. Изображенная на рис. 1,б схема представляет собой простейший RC-фильтр нижних частот, который без изменений передает низкочастотные и обеспечивает затухание высокочастотных сигналов и их запаздывание по фазе относительно входных сигналов. Частотная характеристика НЧ-фильтра (рис. 1,б) может быть представлена в комплексной форме следующим образом:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}.$$

Отсюда получаем выражение для амплитудно-частотной характеристики:

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad \text{или} \quad H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_B}\right)^2}}.$$

Выражение для фазо-частотной характеристики будет иметь такой вид:

$$\varphi(\omega) = -\arctg(\omega RC) \quad \text{или} \quad \varphi(f) = -\arctg\left(\frac{f}{f_B}\right)$$

Здесь  $f_B = \frac{1}{2\pi RC}$  – верхняя граничная частота НЧ-фильтра.

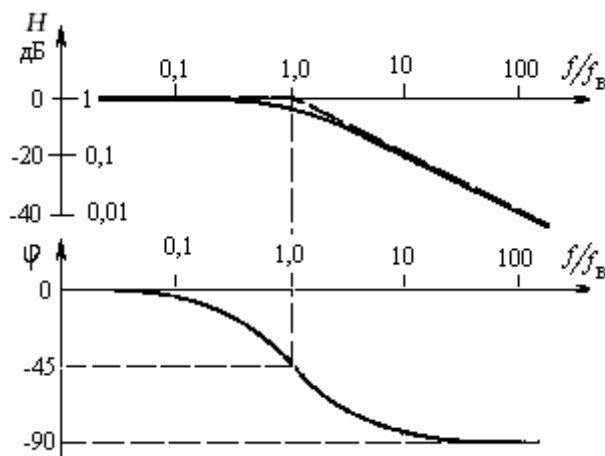


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ НЧ-фильтра

На частоте среза коэффициент передачи  $H(f_{\text{в}}) = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ , что в логарифмическом масштабе соответствует – 3дБ. Фазовый сдвиг на этой частоте равен – 45°.

Графики АЧХ и ФЧХ изображены на рис. 4. Как видно из рис. 4, амплитудно-частотную характеристику проще всего составить из двух асимптот:

- на нижних частотах ( $f < f_{\text{в}}$ )  $H(f) = 1 \Rightarrow 0$  дБ ,
- на высоких частотах ( $f \gg f_{\text{в}}$ )  $H(f) \approx \frac{f_{\text{в}}}{f}$ , т.е. коэффициент усиления обратно пропорционален частоте.

Таким образом, при увеличении частоты в 10 раз коэффициент усиления уменьшается тоже в 10 раз. А это для характеристики, построенной в логарифмическом масштабе, эквивалентно наклону –20дБ на декаду.

На рис. 1,а изображен другой простейший RC-фильтр – верхних частот. Он без изменений передает высокочастотные сигналы и обеспечивает затухание низкочастотных. Его частотная характеристика в комплексной форме может быть представлена следующим образом:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega RC}}.$$

Отсюда получаем выражение для амплитудно-частотной характеристики:

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} \quad \text{или} \quad H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{\text{н}}}{f}\right)^2}}.$$

Выражение для фазо-частотной характеристики будет иметь такой вид:

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{1}{\omega RC}\right) \quad \text{или} \quad \varphi(f) = \arctg\left(\frac{f_{\text{н}}}{f}\right).$$

Здесь  $f_n = \frac{1}{2\pi RC}$  – нижняя граничная частота или частота среза ВЧ-фильтра.

На частоте среза коэффициент передачи  $H(f_n) = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$ , что в логарифмическом масштабе соответствует – 3дБ. Фазовый сдвиг на этой частоте равен  $+45^\circ$ .

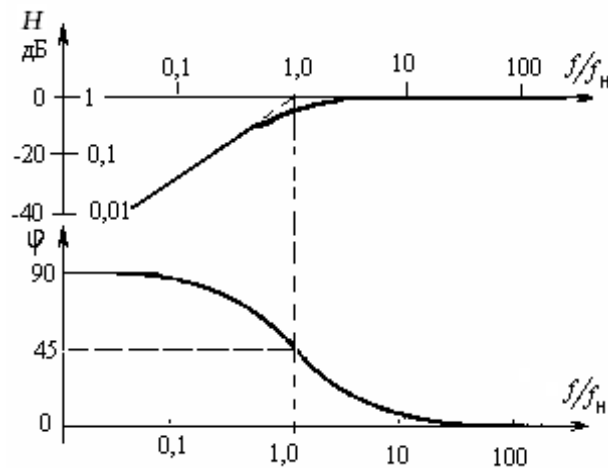


Рис. 5. АЧХ и ФЧХ ВЧ-фильтра

Графики АЧХ и ФЧХ для ВЧ-фильтра изображены на рис. 5. Как и для НЧ-фильтра, амплитудно-частотную характеристику ВЧ-фильтра в двойном логарифмическом масштабе проще всего составить из двух асимптот:

- на высоких частотах ( $f > f_n$ )  $H(f) = 1 \Rightarrow 0$  дБ ,
- на низких частотах ( $f \ll f_n$ )  $H(f) \approx \frac{f}{f_n}$ , т.е. коэффициент усиления пропорционален частоте.

Таким образом, при увеличении частоты в 10 раз коэффициент усиления тоже увеличивается в 10 раз. А это для характеристики, построенной в двойном логарифмическом масштабе, эквивалентно наклону +20дБ на декаду.

Для анализа схем (рис. 1,а и б) во временной области на вход надо подать прямоугольный импульс напряжения. Выражение для переходной характеристики в этом случае можно записать в виде:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВЫХ}}(\infty) - [U_{\text{ВЫХ}}(\infty) - U_{\text{ВЫХ}}(0)]e^{-t/\tau},$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}(\infty)$  – напряжение на выходе в установившемся режиме;

$U_{\text{ВЫХ}}(0)$  – выходное напряжение в момент скачка входного напряжения;

$\tau = RC$  – постоянная времени.

Диаграммы выходного напряжения для схемы НЧ-фильтра (рис. 1,б) при разных скачках входного сигнала показаны на рис. 6, а для схемы ВЧ-фильтра (рис. 1,а) на рис. 7 и 8.

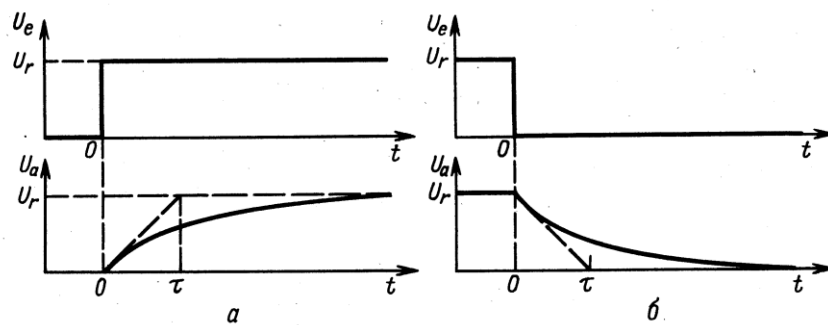


Рис. 6. Переходные процессы в НЧ-фильтре

Для интегрирующей цепи (рис. 1,б) характерно наличие фронта (рис. 6,а) или среза (рис. 6,б) в выходном сигнале. Время нарастания (среза) импульса можно определить из общей формулы

$$t_2 - t_1 = \tau \ln \frac{U_{\text{ВЫХ}}(\infty) - U_{\text{ВЫХ}}(t_1)}{U_{\text{ВЫХ}}(\infty) - U_{\text{ВЫХ}}(t_2)},$$

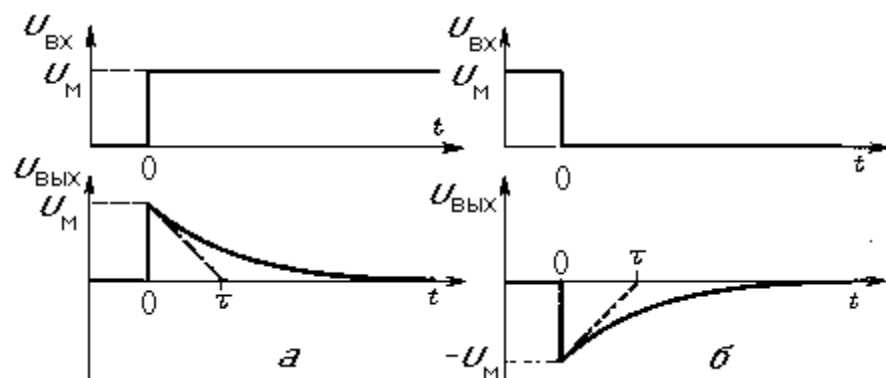
где  $U_{\text{ВЫХ}}(t_1)$  и  $U_{\text{ВЫХ}}(t_2)$  – выходное напряжение в соответствующие моменты времени.

Тогда время фронта, определяемое по уровням 0,1...0,9, равно  $t_{\phi} = 2,2\tau$ .

Для среза аналогично  $t_c = 2,2\tau$ .

Для схемы с разделительным конденсатором (рис. 1,а) возможны два случая.

Если постоянная времени для этой схемы мала по сравнению с длительностью входного сигнала ( $t_{\text{вх}} \gg \tau$ ), то конденсатор в этом случае называется дифференцирующим или укорачивающим. За время действия входного импульса он успеет полностью зарядиться или разрядиться. Таким образом, перепад входного напряжения приведет к появлению на выходе конечного по длительности импульса положительной (рис. 7,а) или отрицательной (рис. 7,б) полярности. Длительность этого импульса, определенную по уровню 0,5, можно рассчитать по формуле  $t_{u \text{ Вых}} \approx 0,7\tau$ .



**Рис. 7. Переходные процессы в ВЧ-фильтре при большой длительности входного сигнала ( $t_{\text{вх}} \gg \tau$ )**

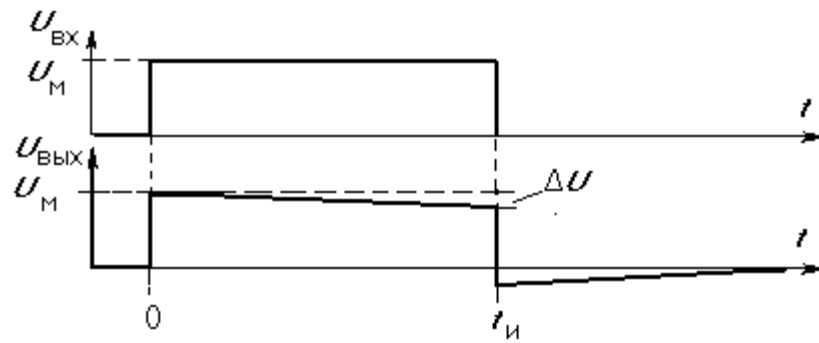
Если длительность входного сигнала мала по сравнению с постоянной времени ( $t_{\text{вх}} \ll \tau$ ), то в этом случае напряжение на конденсаторе за время действия входного сигнала не успеет существенно измениться, и форма выходного сигнала практически повторит форму входного импульса. Конденсатор в этом случае называется разделительным или конденсатором связи. Однако на выходе при этом будет спад плоской вершины выходного импульса  $\Delta u$  (рис. 8). Относительный спад плоской вершины  $\delta u$

рассчитывается по формуле

$$\delta u = \frac{\Delta u}{U_{\text{м}}} 100\% = \frac{t_{\text{вх}}}{\tau} 100\%.$$

Данной формулой можно пользоваться, если  $\delta u$  не превосходит 10...15%.





**Рис. 8. Переходные процессы в ВЧ-фильтре при малой длительности входного сигнала ( $t_n \ll \tau$ )**

### 8. Контрольные вопросы и задачи

1. Дайте определение амплитудно-частотной характеристики.
2. Как определить граничную частоту фильтра по АЧХ, построенной в линейном и логарифмическом масштабах.
3. Как связан относительный спад плоской вершины с нижней граничной частотой ВЧ-фильтра (рис.1,а).
4. Как связана верхняя граничная частота НЧ-фильтра с длительностью фронта выходного сигнала (рис.1,б).
5. Определите связь граничной частоты и постоянной времени цепи для схем, изображенных на рис.1.
6. Для одной из схем первого порядка с двумя резисторами (рис. 9), где  $R_1=R_2=1\text{кОм}$ , а  $C=10\text{нФ}$ :
  - определить постоянную времени цепи  $\tau$ ;
  - получить выражение для амплитудно-частотной характеристики, нарисовать ее и определить граничную частоту;
  - получить выражение для переходной характеристики и изобразить ее для случая, когда длительность входного импульса  $t_{\text{и}}=100\text{мкс}$ .

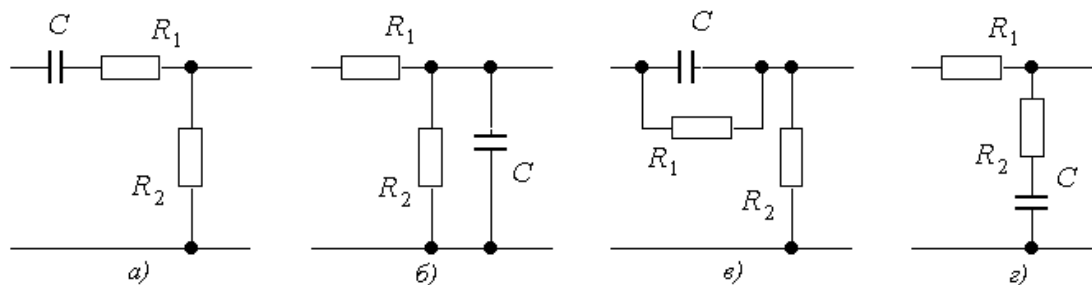


Рис. 9. Схемы фильтров первого порядка с двумя резисторами

## **9. Литература**

1. **Генератор сигналов специальной формы GFG-3015.** Руководство по эксплуатации.
2. **Осциллограф цифровой GDS-2062.** Руководство по эксплуатации.
3. **Электротехника и электроника:** Учебник для вузов. В 3-х кн. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники/ Г.П. Гаев, В.Г., Герасимов, О.М. Князьков и др.; Под ред. проф. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
4. **Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И.** Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов /Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000.