

## СОДЕРЖАНИЕ

Задание 1. Расчет одноконтурной электрической цепи переменного тока.....	3
Условие.....	3
Решение.....	3
Задание 2. Расчет разветвленной цепи постоянного тока.....	5
Условие.....	5
Решение.....	5
Задание 3. Расчет последовательного резонансного контура.....	6
Условие.....	6
Решение.....	6
Задание 4. Расчет узловых потенциалов одноконтурной цепи постоянного тока.....	6
Условие.....	6
Решение.....	7
Задание 5. Описание однотактной и двухтактной схем усиления мощности.....	9
Условие.....	9
Решение.....	9
Задание 6. Описание трехточечных автогенераторов.....	10
Условие.....	10
Решение.....	11
Задание 7. Описание диодного амплитудного детектора.....	12
Условие.....	12
Решение.....	12
Задание 8. Расчет аналогового вычислительного устройства.....	15
Условие.....	15
Решение.....	15
ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	21

## Задание 1. Расчет одноконтурной электрической цепи переменного тока

### Условие

Для заданной электрической цепи выполнить действия:

- вычислить полное сопротивление данной цепи, действующие значения напряжений на реактивных элементах и реактивную мощность цепи;
- написать выражения мгновенного значения тока в электрической цепи;
- построить графики изменения во времени напряжений на реактивных элементах.

Входные данные:

$$u = 360 \sin 860t \quad ; \quad L_1 = 360 \text{ мГн} \quad ; \quad L_2 = 210 \text{ мГн} \quad ; \quad C_1 = 40 \text{ мкФ} \quad ; \quad C_2 = 24 \text{ мкФ} \quad ; \quad R_1 = 40 \text{ Ом} \quad ; \quad R_2 = 48 \text{ Ом} \quad .$$

Схема электрической цепи изображена на рисунке 1.

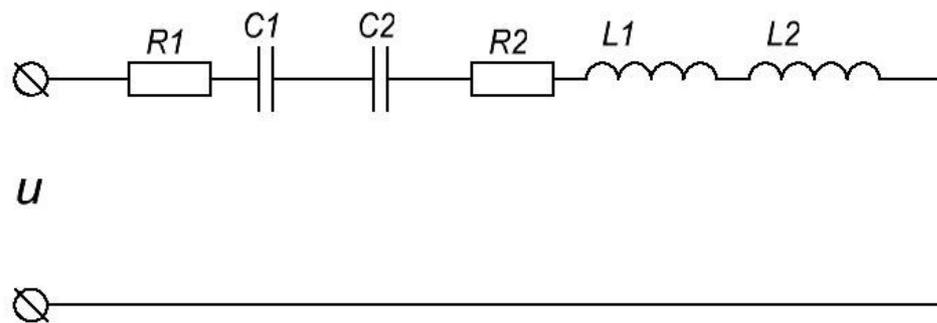


Рисунок 1. Схема электрической цепи с активными и реактивными элементами

### Решение

Полное сопротивление приведенной электрической цепи равно:

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_{L1} + X_{L2} - X_{C1} - X_{C2})^2} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + \left( 860L_1 + 860L_2 - \frac{1}{860C_1} - \frac{1}{860C_2} \right)^2} =$$
$$= \sqrt{(40 + 48)^2 + \left( 860 \cdot 360 \cdot 10^{-3} + 860 \cdot 210 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{860 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} - \frac{1}{860 \cdot 24 \cdot 10^{-6}} \right)^2} = 421,96 \text{ Ом}.$$

Действующее значение тока в цепи равно:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{360}{\sqrt{2}Z} = \frac{360}{\sqrt{2} \cdot 421,96} = 0,603 \text{ А} \quad .$$

Действующие значения напряжений на реактивных элементах цепи равны:

$$U_{C1} = X_{C1}I = \frac{I}{860C_1} = \frac{0,603}{860 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} = 17,53 \text{ В};$$

$$U_{C2} = X_{C2}I = \frac{I}{860C_2} = \frac{0,603}{860 \cdot 24 \cdot 10^{-6}} = 29,22 \text{ В};$$

$$U_{L1} = X_{L1}I = 860 \cdot 360 \cdot 10^{-3} \cdot 0,603 = 186,7 \text{ В};$$

$$U_{L2} = X_{L2}I = 860 \cdot 210 \cdot 10^{-3} \cdot 0,603 = 108,9 \text{ В}.$$

Реактивная мощность электрической цепи равна:

$$Q = X_{\Sigma} I^2 = (X_{L1} + X_{L2} - X_{C1} - X_{C2}) \cdot I^2 =$$

$$= \left( 860 \cdot 360 \cdot 10^{-3} + 860 \cdot 210 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{860 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} - \frac{1}{860 \cdot 24 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot 0,603^2 = 150,2 \text{ Вар.}$$

Выражение для мгновенного тока в цепи имеет вид:

$$i(t) = I_m \sin(860t - \varphi) = \frac{U_m}{Z} \sin \left( 860t - \arctan \left( \frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} \right) \right) =$$

$$= \frac{360}{421,96} \sin \left( 860t - \arctan \left( \frac{860 \cdot 360 \cdot 10^{-3} + 860 \cdot 210 \cdot 10^{-3} - \frac{1}{860 \cdot 40 \cdot 10^{-6}} - \frac{1}{860 \cdot 24 \cdot 10^{-6}}}{40 + 48} \right) \right) =$$

$$= 0,872 \sin(860t - 1,361) \text{ A.}$$

Выражения для мгновенных значений напряжений на реактивных элементах имеют вид:

$$u_{C1} = \sqrt{2} U_{C1} \sin \left( 860t - \varphi + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$u_{C2} = \sqrt{2} U_{C2} \sin \left( 860t - \varphi + \frac{\pi}{2} \right)$$

$$u_{L1} = \sqrt{2} U_{L1} \sin \left( 860t - \varphi - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$u_{L2} = \sqrt{2} U_{L2} \sin \left( 860t - \varphi - \frac{\pi}{2} \right)$$

Графики функций напряжений на реактивных элементах приведены на рисунке 2.

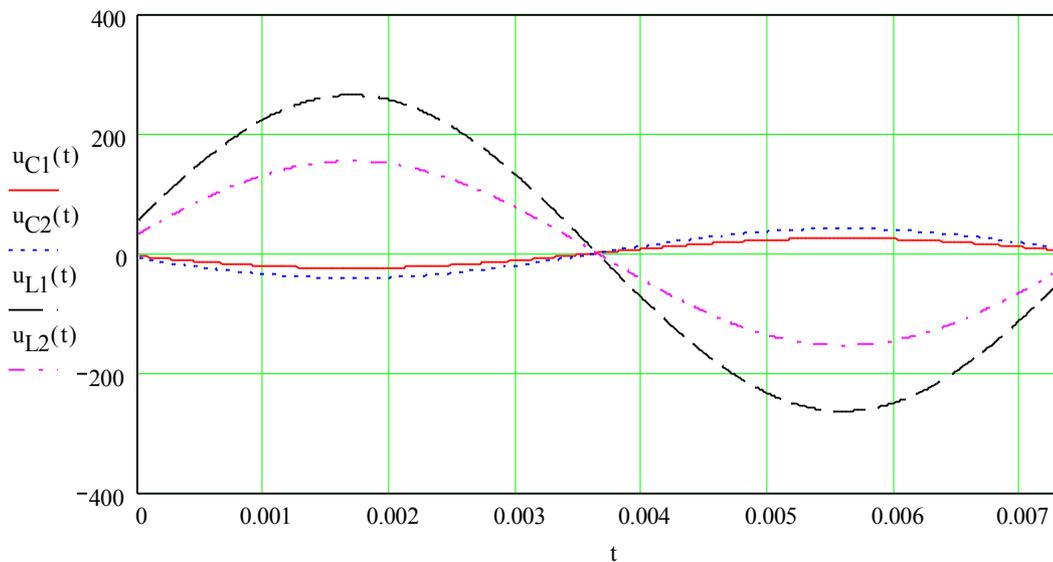


Рисунок 2. Графики функций напряжений на реактивных элементах цепи за один период колебаний.

## Задание 2. Расчет разветвленной цепи постоянного тока

### Условие

Определить величину тока, протекающего через сопротивление  $R_4$ , при следующих входных данных электрической цепи:

$$U_{AB} = 150 \text{ В}; R_1 = R_2 = R_7 = R_9 = R_{10} = 10 \text{ Ом}; R_3 = R_6 = R_8 = 20 \text{ Ом}; R_4 = R_5 = 5 \text{ Ом}$$

Изображение электрической цепи приведено рисунке 3.

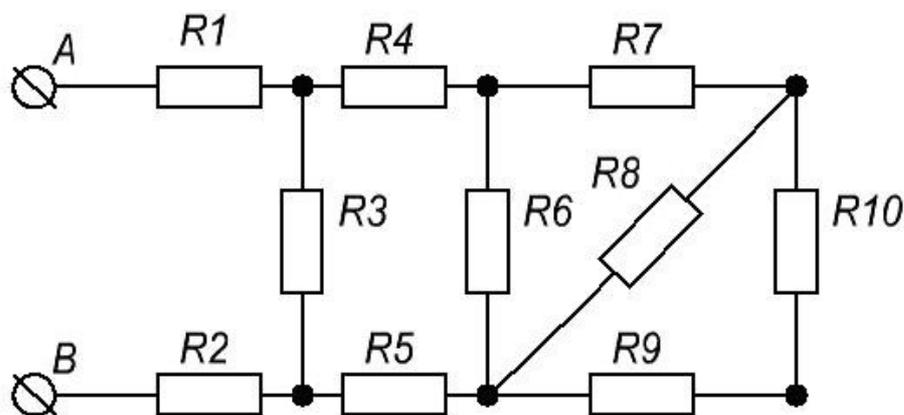


Рисунок 3. Схема разветвленной электрической цепи постоянного тока.

### Решение

Определим эквивалентное сопротивление цепи по отношению зажимам АВ:

$$R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + \frac{R_3 \cdot \left( R_4 + R_5 + \frac{R_6 \cdot \left( R_7 + \frac{R_8 \cdot (R_9 + R_{10})}{R_8 + R_9 + R_{10}} \right)}{R_6 + R_7 + \frac{R_8 \cdot (R_9 + R_{10})}{R_8 + R_9 + R_{10}}} \right)}{R_3 + R_4 + R_5 + \frac{R_6 \cdot \left( R_7 + \frac{R_8 \cdot (R_9 + R_{10})}{R_8 + R_9 + R_{10}} \right)}{R_6 + R_7 + \frac{R_8 \cdot (R_9 + R_{10})}{R_8 + R_9 + R_{10}}}} = 10 + 10 +$$

$$+ \frac{20 \cdot \left( 5 + 5 + \frac{20 \cdot \left( 10 + \frac{20 \cdot (10 + 10)}{20 + 10 + 10} \right)}{20 + 10 + \frac{20 \cdot (10 + 10)}{20 + 10 + 10}} \right)}{20 + 5 + 5 + \frac{20 \cdot \left( 10 + \frac{20 \cdot (10 + 10)}{20 + 10 + 10} \right)}{20 + 10 + \frac{20 \cdot (10 + 10)}{20 + 10 + 10}}} = 30 \text{ Ом.}$$

Ток, потребляемый цепью, равен:

$$I = \frac{U_{AB}}{R_{\Sigma}} = \frac{150}{30} = 5 \text{ А}$$

Падение напряжения на сопротивлении R3 равно:

$$U_{R3} = \mathcal{E} /_{AB} - I(R1 + R2) = 150 - 5(10 + 10) = 50 \text{ В}$$

Ток через сопротивление R3 равен:

$$I_3 = \frac{U_{R3}}{R3} = \frac{50}{20} = 2,5 \text{ А}$$

Искомый ток, протекающий через сопротивление R4 равен:

$$I_4 = I - I_3 = 5 - 2,5 = 2,5 \text{ А}$$

### Задание 3. Расчет последовательного резонансного контура

#### Условие

При емкости 10 мкФ резонансная частота последовательного колебательного контура была равна 50 кГц. Какова будет резонансная частота при емкости 0,1, 1 и 3 мкФ.

#### Решение

Резонансная частота колебательного контура определена выражением:  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

Таким образом, при известной емкости, индуктивность контура равна:

$$L = \frac{1}{\sqrt{4\pi^2 f_0^2 C}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi^2 50000^2 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}} = 1,007 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} = 1,007 \text{ мГн}$$

При известной индуктивности, задавая значения емкостей, получим соответствующие им значения резонансных частот:

$$C = 0,1 \text{ мкФ};$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,007 \cdot 0,1 \cdot 10^{-9}}} = 15,86 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

$$C = 1 \text{ мкФ};$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,007 \cdot 1 \cdot 10^{-9}}} = 4,78 \cdot 10^3 \text{ Гц};$$

$$C = 3 \text{ мкФ};$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{1,007 \cdot 3 \cdot 10^{-9}}} = 2,896 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

### Задание 4. Расчет узловых потенциалов одноконтурной цепи постоянного тока

#### Условие

Построить график потенциала цепи, изображенной на рисунке 4, при замкнутом и при разомкнутом ключе, предполагая в обоих случаях, что потенциал точки «а» равен 0.

**Примечание.** При выполнении задания необходимо предварительно рассчитать потенциалы отдельных узлов цепи (а, b, с, d, e, f, g, h, k). При вычислении потенциалов узлов, учитывать знаки заданных ЭДС источников.

Исходные данные:

$E_1 = 25 \text{ В}; E_2 = -5 \text{ В}; E_3 = 20 \text{ В}; E_4 = 35 \text{ В};$   
 $R_1 = 38 \text{ Ом}; R_2 = 54 \text{ Ом}; R_3 = 69 \text{ Ом}; R_4 = 34 \text{ Ом};$   
 $R_{01} = 32 \text{ Ом}; R_{02} = 36 \text{ Ом}; R_{03} = 32 \text{ Ом}; R_{04} = 34 \text{ Ом}.$

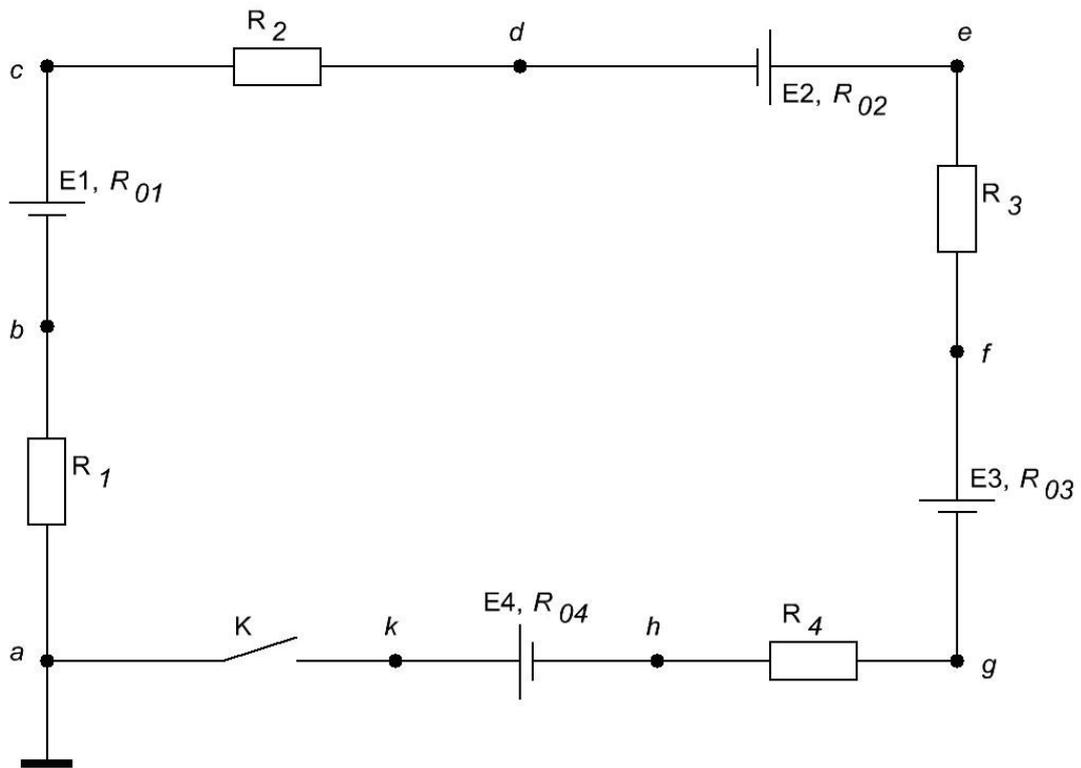


Рисунок 4. Схема электрической одноконтурной цепи постоянного тока

### Решение

При разомкнутом ключе, имеет место следующее распределение потенциалов в узлах электрической цепи:

$$\begin{aligned}
 \varphi_a = \varphi_b &= 0; \\
 \varphi_c = \varphi_d &= E_1 = 25 \text{ В}; \\
 \varphi_e &= E_1 + E_2 = 25 - 5 = 20 \text{ В}; \\
 \varphi_f &= \varphi_e = 20 \text{ В}; \\
 \varphi_g &= E_1 + E_2 - E_3 = 25 - 5 - 20 = 0; \\
 \varphi_h = \varphi_g &= 0; \\
 \varphi_k &= E_4 = 35 \text{ В}.
 \end{aligned}$$

При замкнутом ключе контур замкнут и в нем протекает ток следующей величины:

$$I = \frac{E_1 + E_2 - E_3 + E_4}{R_1 + R_{01} + R_2 + R_{02} + R_3 + R_{03} + R_4 + R_{04}} = \frac{25 - 5 - 20 + 35}{38 + 32 + 54 + 36 + 69 + 32 + 34 + 34} = 0,106 \text{ А} .$$

Таким образом, при замкнутом ключе, распределение потенциалов в узлах цепи будет равно:

$$\begin{aligned} \varphi_a &= 0; \\ \varphi_b &= -I \cdot R_1 = 0,106 \cdot 38 = -4,043 \text{ В}; \\ \varphi_c &= E1 - I \cdot R_{01} + \varphi_b = 25 - 0,106 \cdot 32 - 4,043 = 17,553 \text{ В}; \\ \varphi_d &= \varphi_c - I \cdot R_2 = 17,553 - 0,106 \cdot 54 = 11,809 \text{ В}; \\ \varphi_e &= E2 - I \cdot R_{02} + \varphi_d = -5 - 0,106 \cdot 36 + 11,809 = 2,979 \text{ В}; \\ \varphi_f &= \varphi_e - I \cdot R_3 = 2,979 - 0,106 \cdot 69 = -4,362 \text{ В}; \\ \varphi_g &= -E3 - I \cdot R_{03} + \varphi_f = -20 - 0,106 \cdot 32 - 4,362 = -27,766 \text{ В}; \\ \varphi_h &= \varphi_g - I \cdot R_4 = -27,766 - 0,106 \cdot 34 = -31,383 \text{ В}; \\ \varphi_k &= 0. \end{aligned}$$

Диаграммы потенциалов в узлах цепи для случаев разомкнутого и замкнутого ключа приведены на рисунках 5 и 6 соответственно.

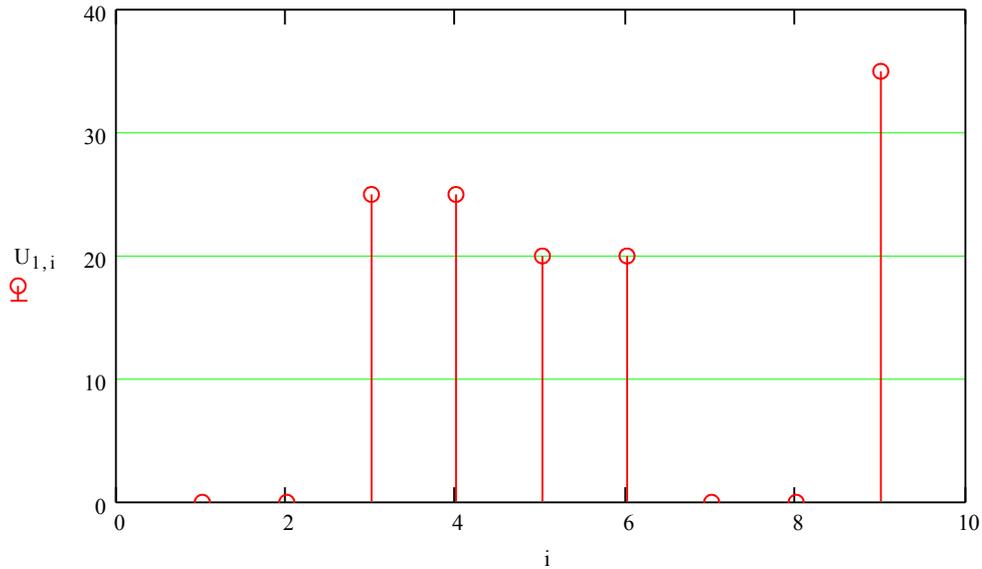


Рисунок 5. Диаграмма потенциалов цепи при разомкнутом ключе К.

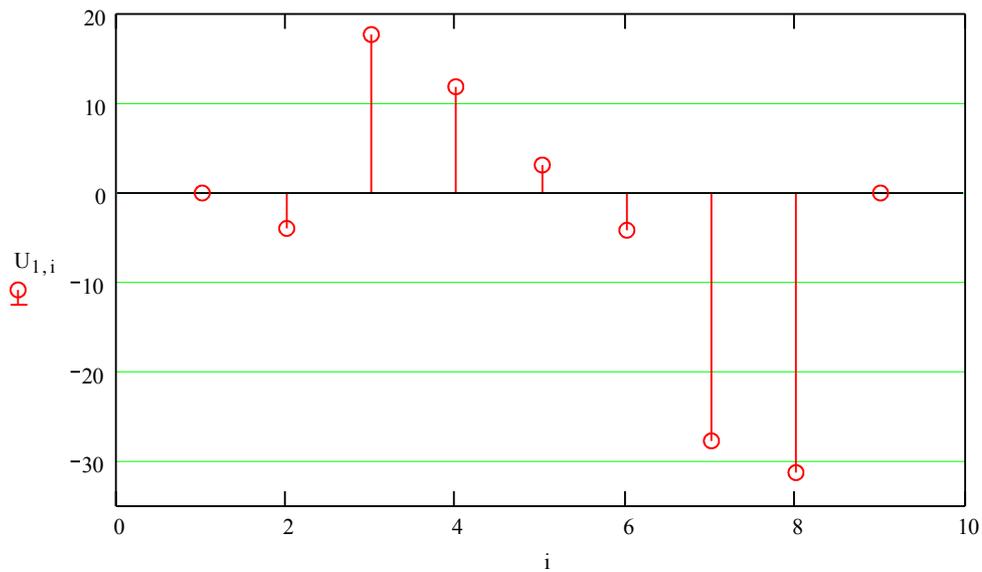


Рисунок 5. Диаграмма потенциалов цепи при замкнутом ключе К.

Примечание. На рисунках 5 и 6  $U = [u_a, u_b, u_c, u_d, u_e, u_f, u_g, u_h, u_k]$  – вектор узловых потенциалов цепи,  $i$  – индексный вектор.

## Задание 5. Описание однотактной и двухтактной схем усиления мощности

### Условие

Изобразите схемы однотактного и двухтактного каскадов усиления мощности. Объясните принцип их работы и назначение выходного трансформатора.

### Решение

Электрические схемы однотактного и двухтактного транзисторных усилителей мощности приведены на рисунках 6 и 7.

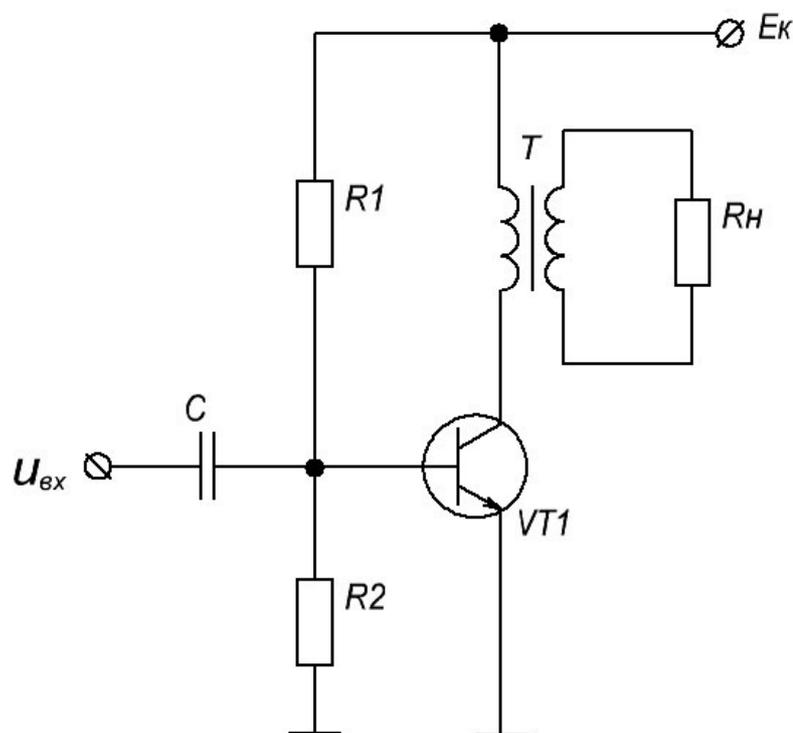


Рисунок 6. Электрическая схема однотактного усилителя мощности с выходным трансформатором.

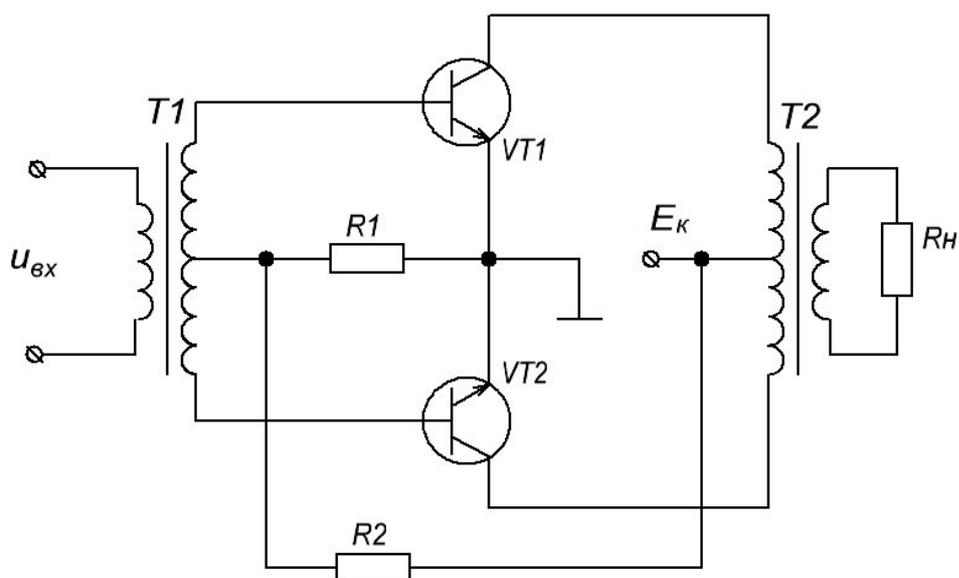


Рисунок 7. Электрическая схема двухтактного усилителя мощности с трансформаторным выходом.

В одноконтном усилителе мощности (рис. 6) входной сигнал поступает на базу транзистора VT1 через разделительный конденсатор емкости  $C$ , который служит для отделения цепи входного сигнала от источника ЭДС  $E_k$ . Режим работы по постоянному току транзистора VT1 задается делителем напряжения  $R1$  и  $R2$ . Трансформатор  $T$  служит для согласования ПО мощности коллекторной цепи транзистора и цепи низкоомной  $R_n$ .

Двухтактный усилитель (рис. 7) позволяет увеличить мощность сигнала в нагрузке практически вдвое, за счет применения двух транзисторов VT1 и VT2. Цепь входного сигнала согласована с базовыми цепями транзисторов через входной трансформатор T1. Режим покоя каждого транзистора задается делителем  $R1$ ,  $R2$  и активным сопротивлением половины вторичной обмотки входного трансформатора. Выходной трансформатор T2, конструктивно аналогичен входному, имеет первичную обмотку с отводом, через который подается питание источника ЭДС  $E_k$  в коллекторные цепи транзисторов.

Для двухтактной схемы характерно лучшее использование выходного трансформатора, поскольку его сердечник не подмагничивается постоянной составляющей магнитного потока, как это происходит одноконтной схеме. В связи с этим нелинейные искажения сигнала снижаются. Однако габариты трансформатора в двухтактной схеме увеличены за счет повышения числа витков первичной обмотки.

## Задание 6. Описание трехточечных автогенераторов

### Условие

Начертить схему и объяснить принцип действия трехточечных автогенераторов. Каковы условия самовозбуждения?

## Решение

Рисунки 8 и 9 содержат электрические схемы трехточечных генераторов, индуктивного и емкостного соответственно.

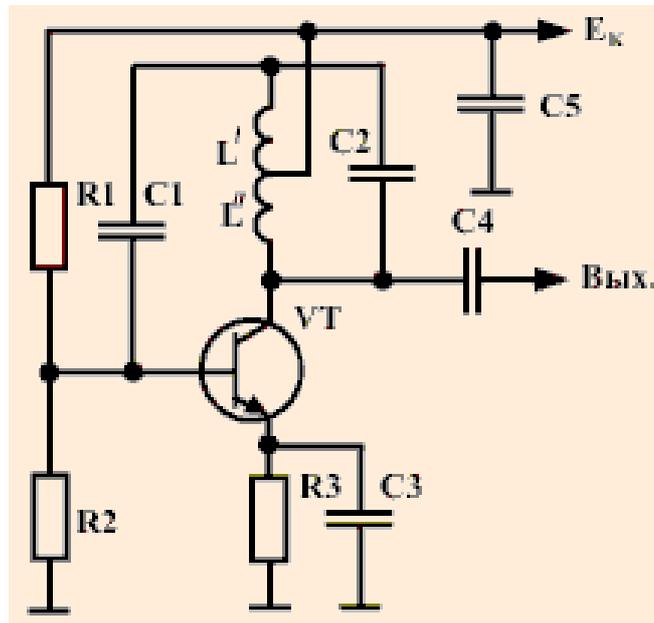


Рисунок 8. Электрическая схема индуктивного трехточечного генератора.

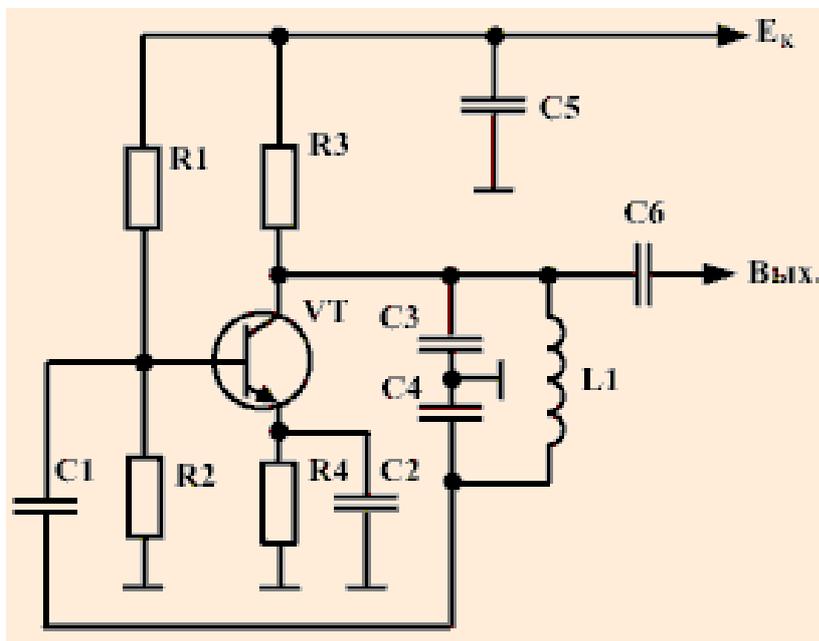


Рисунок 9. Электрическая схема емкостного трехточечного генератора.

Рассмотрим работу схемы индуктивного трехточечного генератора (рис. 8). Элементы R1, R2, R3, C3, обеспечивают режим работы по постоянному току транзистора VT, в коллекторную цепь которого включен колебательный контур L'L"C2. Выходной сигнал снимается с коллектора транзистора VT (или с L"), а сигнал ПОС - с катушки L'. Поскольку напряжения

этих сигналов противофазны, то автоматически выполняется условие баланса фаз. Условие баланса амплитуд выполняются подбором числа витков  $L'L''$ . Эти два условия являются необходимыми для самовозбуждения генератора.

Сигнал ПОС подается на базу транзистора через разделительный конденсатор  $C1$ , сопротивление которого на частоте генерации мало. Этот конденсатор предотвращает попадание постоянной составляющей в базовую цепь через индуктивность  $L'$ . Общая точка  $L'$  и  $L''$  подключена к источнику питания  $E_k$ , сопротивление которого переменному току незначительно. Конденсатор  $C5$  является фильтром напряжения питания источника. Конденсатор  $C4$  – разделительный, предназначенный для упразднения постоянной составляющей выходного сигнала в нагрузке генератора.

Частота генерации определяется выражением:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L' + L'')C2}}$$

Рассмотрим работу схемы емкостной трехточки (рис. 9). В этой схеме, аналогично предыдущей, режим по постоянному току определяют элементы  $R1, R2, R3, R4, C2$ . В коллекторную цепь транзистора включен контур  $L1C3C4$ . Сигнал ПОС снимается с конденсатора  $C4$  и через конденсатор  $C1$  поступает в базовую цепь транзистора  $VT$ .  $C1$  не пропускает высокое коллекторное напряжение на базу транзистора. Общую точку конденсаторов  $C3, C4$  можно считать подключенной к источнику питания, поскольку его сопротивление переменному току незначительно. Условие самовозбуждения достигается при балансе фаз напряжения на коллекторе транзистора и сигнала ПОС, а также балансом амплитуд, который достигается подбором номиналов емкостей контура  $C3, C4$  с учетом получения желаемой частоты генерации сигнала.

Частота генерации определяется выражением:

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L1 \frac{C3 \cdot C4}{C3 + C4}}}$$

## Задание 7. Описание диодного амплитудного детектора

### Условие

Начертить схему и объяснить работу диодного амплитудного детектора.

### Решение

Электрическая схема диодного амплитудного детектора приведена на рисунке 10. На вход детектора поступает высокочастотный сигнал  $u_c(t)$ . Детектор представляет собой последовательное соединение диода  $VD$  и нагрузочной цепи (фильтра): конденсатора  $C_n$  и резистора  $R_n$ , включенных параллельно. С нагрузочной цепи снимается выходной сигнал  $u_{\text{вых}}(t)$ .

Значение тока через диод  $i_g$  для режима покоя ( $u_c(t)=0$ ) может быть найдено из уравнений:

$$\begin{cases} i_g = f(U_g) \\ i_g = -\frac{u_{\text{вых}}}{R_n} \end{cases}$$

где  $U_g$  – напряжение на диоде  $VD$  (рис. 10).

Первое уравнение является уравнением вольтамперной характеристики (ВАХ) диода как безынерционного нелинейного элемента. Из-за нелинейного характера ВАХ, форма тока через диод  $i_g$  при синусоидальной форме сигнала  $u_c(t)$  не является синусоидальной. В составе тока

появляется постоянная составляющая, которая, протекая по резистору  $R_n$ , создает падение напряжения  $U_+$ , смещающая положение рабочей точки. При увеличении амплитуды входного напряжения смещение рабочей точки увеличивается, и ток через диод будет приближаться по форме к однополярным импульсам, открывающим диод при положительных значениях входного напряжения.

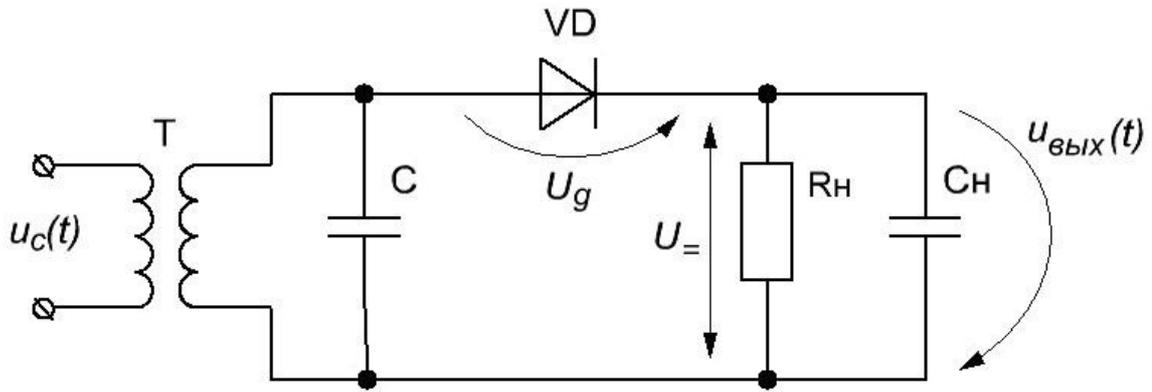


Рисунок 10. Электрическая схема диодного амплитудного детектора.

На рисунке 11 приведены формы напряжений и токов на входе детектора для двух случаев, когда амплитуды входных сигналов удовлетворяют неравенству  $U_c^{(1)} < U_c^{(2)}$ . Тогда постоянные составляющие напряжений  $U_+^{(1)} < U_+^{(2)}$  и  $I_+^{(1)} < I_+^{(2)}$ . На этом же рисунке условно изображена зависимость  $i_g = f(t)$ .

Вольтамперная характеристика диода в широком диапазоне токов достаточно точно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью:

$$i_g = I_{об} (e^{u_g(t)/\varphi_T} - 1) \quad , \quad (7.1)$$

где  $I_{об}$  – абсолютное значение величины обратного тока диода,  $\varphi_T$  – температурный потенциал, равный при  $T = 293^\circ \text{ К}$  примерно 26 мВ.

Зависимость постоянной составляющей  $U_+$  от амплитуды приложенного напряжения  $U_c$  дается детекторной характеристикой (рис. 3).

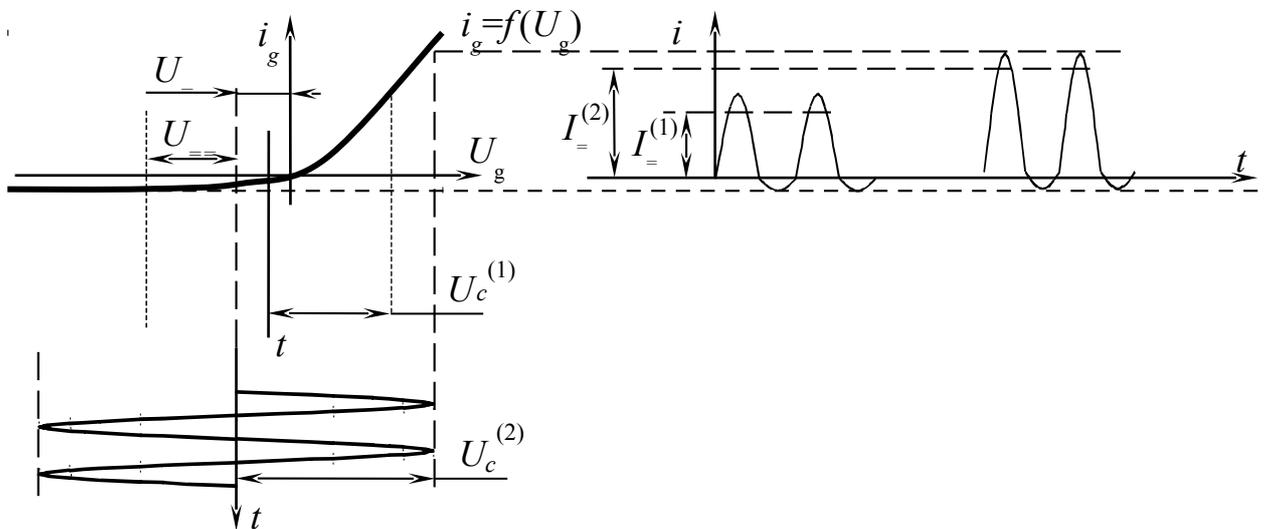


Рисунок 11. Детектирование амплитудно-модулированных сигналов.

Анализ выражения (7.1) позволяет сделать два основных вывода:

- с увеличением  $R_n$  возрастает крутизна детекторной характеристики;
- с увеличением уровня сигнала снижается степень нелинейности детекторной характеристики, и наоборот, детектирование «слабых» сигналов сопровождается значительными нелинейными искажениями закона модуляции.

В этой связи различают два режима работы диодного амплитудного детектора:

- детектирование «слабых» сигналов;
- детектирование «сильных» сигналов.

В режиме «слабых» сигналов, нетрудно показать, что детекторная характеристика имеет квадратичный вид, т.е.

$$U_- = AU_c^2 [1 + m_a x(t)]^2 ,$$

и, соответственно, коэффициент нелинейных искажений в этом случае при  $x(t) = 0$  равен:

$$k_n = \frac{AU_c^2 0,5m_a^2}{AU_c^2 2m_a} = \frac{m_a}{4} .$$

Например, допустимое значение  $k_n$  в системах радиовещания не превышает нескольких процентов ( $k_n \leq 5\%$ ), что налагает ограничения на допустимый коэффициент глубины амплитудной модуляции в передатчике. Дополнительным недостатком работы на квадратичном участке детекторной характеристики является малый коэффициент передачи, затрудняющий работу последующих усилительных каскадов.

В режиме «сильных» сигналов вольтамперная характеристика диода аппроксимируется линейной зависимостью  $i_g = f(u_g)$  (5). В этом случае появляется заметное напряжение смещения на анод диода из-за значительной величины  $U_-$ , т.е. диод работает в режиме отсечки, и ток проходит через него только в течение тех интервалов времени, когда  $U_c - U_- > 0$ . На интервале времени, соответствующем углу  $2\theta$ , происходит быстрый заряд конденсатора  $C_n$  (рис. 10) через открытый диод. В течение времени, когда диод закрыт, конденсатор  $C_n$  разряжается через резистор  $R_n$ .

Т.о., несмотря на наличие угла отсечки, диодный детектор и в режиме «сильных» сигналов является линейным детектором и при малых значениях угла  $\theta$  не создает нелинейных искажений модулирующего сигнала  $x(t)$ .

Нелинейные искажения при детектировании «сильных» сигналов определяются:

- нелинейностью начального участка вольтамперной характеристики диода. При этом, чтобы гарантировать работу вне существенно нелинейного участка, например, в области  $0 \leq U_c \leq U_c^{(1)}$  на рис. 11, необходимо выбирать значение  $U_c$  исходя из неравенства:  $U_c \geq \frac{U_c^{(1)}}{1 - m_a}$  ;

- различием сопротивлений детектора по постоянному и переменному токам. При использовании усилителя с входным сопротивлением  $R_{\text{вх}} \geq (5 - 10)R_n$  и выборе величины емкости разделительного конденсатора  $C_p$ , обеспечивающей его малое сопротивление по переменному току по сравнению с  $R_{\text{вх}}$  из условия:  $C_p > \frac{1}{\Omega_{\text{min}} R_{\text{вх}}}$  , где  $\Omega_{\text{min}}$  – минимальная частота модулирующего сигнала, этим видом нелинейных искажений можно пренебречь;

- нелинейностью процесса заряда и разряда конденсатора  $C_n$ . При этом возникает фазовый сдвиг между напряжениями  $U_-$  и  $u_a(t)$ . В моменты времени, когда  $u_a(t) < U_-$ , конденсатор  $C_n$  будет разряжаться через резистор  $R_n$  по экспоненциальному закону. Анализ показывает, что малый уровень нелинейных искажений этого вида обеспечивается при условии:

$$R_n C_n \Omega_{\text{max}} \leq \frac{\sqrt{1 - m_a^2}}{m_a} ,$$

где  $\Omega_{\text{max}}$  – максимальная частота модулирующего сигнала.

Кроме рассмотренных выше нелинейных искажений в режиме детектирования «сильных» сигналов возникают частотные искажения, обусловленные присутствием в выходном напряжении гармоник высокочастотного колебания. С целью уменьшения уровня колебания

высокой частоты на выходе амплитудного детектора величина емкости конденсатора  $C_H$  выбирается из условия:

$$\frac{1}{\omega_c C_H} \ll R_H,$$

а коэффициент фильтрации в этом случае определяется выражением:

$$k_{\text{ф}} = \frac{R_H}{R_H + r_g},$$

где  $r_g$  – сопротивление диода в открытом состоянии.

## Задание 8. Расчет аналогового вычислительного устройства

### Условие

Разработать структурную и принципиальную схемы аналогового вычислительного устройства (АВУ) на основе ОУ, выходной сигнал  $Y$  которого определяется выражением:

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3,$$

где  $X_1, X_2, X_3$  – входные сигналы.

Исходными данными для расчета являются:

а) входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  со стороны входов, определяемое по формуле:

$$R_{\text{вх}} = 3 + n_1 \text{ [кОм]};$$

б) амплитудные (максимальные) значения входных сигналов  $X_{1m}, X_{2m}, X_{3m}$ , определяемые по формулам:

$$X_{1m} = X_{3m} = 0,1 + \frac{n_1}{10} [B];$$

$$X_{2m} = 0,3 + \frac{n_2}{20} [B];$$

в) максимальное значение частоты входных сигналов  $F_m$ , определяемое по формуле:

$$F_m = 3 + n_2 \text{ [кГц]};$$

г) значения коэффициентов  $a, b, c$ , определяемые по формулам:

$$a = n_1 \cdot (-1)^{n_1} - 1;$$

$$b = n_2 \cdot (-1)^{n_2} - 1;$$

$$c = \frac{a + b}{2}.$$

Примечание:  $n_1 = 7; n_2 = 8.$

### Решение

Согласно варианту значения входных данных таковы:

$$R_{\text{вх}} = 3 + 7 = 10 \text{ кОм};$$

$$X_{1m} = 0,1 + \frac{7}{10} = 0,8 \text{ В};$$

$$X_{2m} = 0,3 + \frac{8}{20} = 0,7 \text{ В};$$

$$X_{3m} = 0,1 + \frac{7}{10} = 0,8 \text{ В};$$

$$F_m = 3 + 8 = 11 \text{ кГц};$$

$$a = 7 \cdot (-1)^7 - 1 = -8;$$

$$b = 8 \cdot (-1)^8 - 1 = 7;$$

$$c = \frac{-8 + 7}{2} = -0,5.$$

Заданному уравнению взаимосвязи сигналов соответствует структурная схема АВУ, приведенная на рисунке 12.

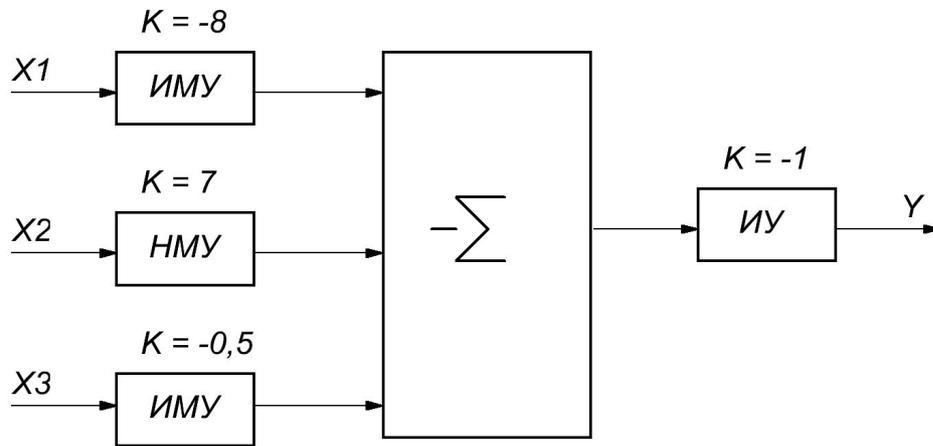


Рисунок 12. Неоптимизированная структурная схема АВУ.

Приведем исходное уравнение АВУ к виду, позволяющему уменьшить кол-во элементов схемы:

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 = -8X_1 + 7X_2 - 0,5X_3 = (-7 - 1)X_1 + 7X_2 - 0,5X_3 = -7X_1 - X_1 + 7X_2 - 0,5X_3 = -7(X_1 - X_2) - X_1 - 0,5X_3 = (-1)[7(X_1 - X_2) + X_1 + 0,5X_3].$$

Таким образом, структурная схема рисунка 12 преобразуется к виду, представленном на рисунке 13.

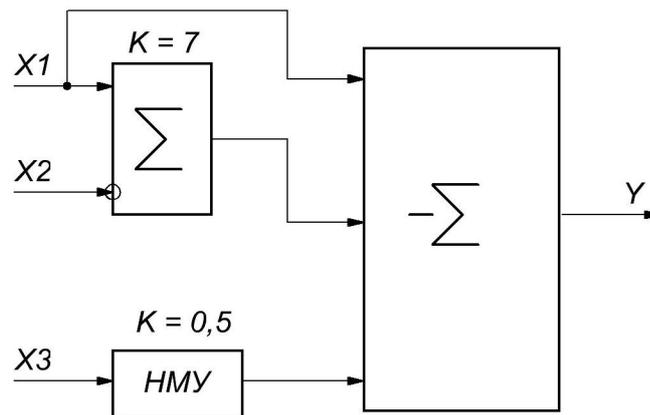
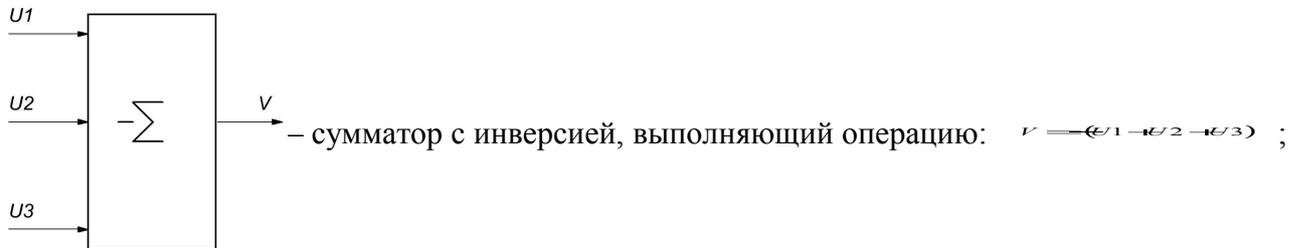
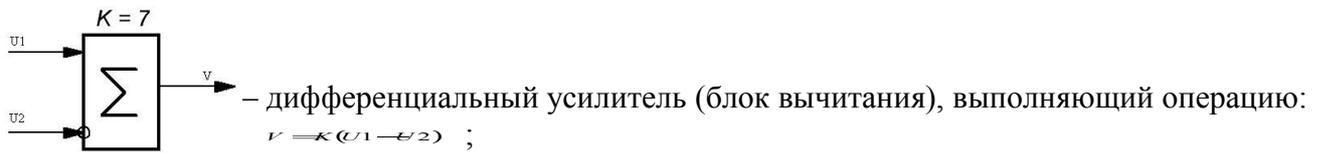


Рисунок 13. Оптимизированная структурная схема АВУ.

Сравнивая исходную и преобразованную схемы, отмечаем что преобразованная (рис. 13) имеет меньшее число элементов (3) в сравнении с исходной (5).

Примечания к структурным схемам рисунков 12 и 13:  
 ИМУ – инвертирующий масштабный усилитель;  
 НМУ – неинвертирующий масштабный усилитель;



### Расчет параметров дифференциального усилителя (блока вычитания)

Произведем расчет параметров дифференциального усилителя (ДУ). Электрическая схема этого элемента приведена на рисунке 14.

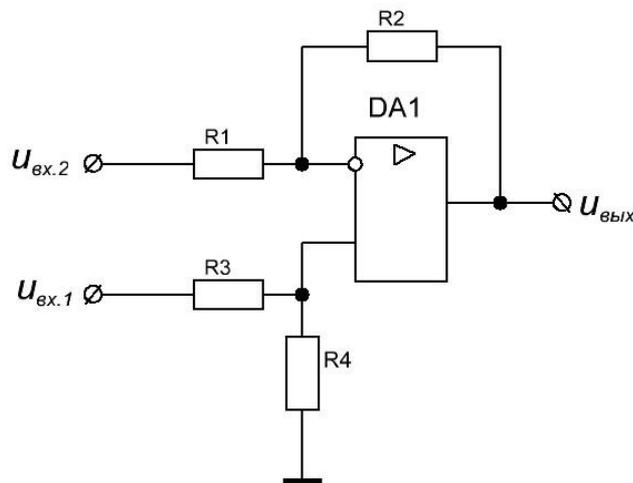


Рисунок 14. Электрическая схема дифференциального усилителя.

Параметры элементов схемы ДУ связаны соотношениями:

$$u_{\text{вых}} = \frac{R2}{R1} (u_{\text{вх.1}} - u_{\text{вх.2}});$$

$$\frac{R3}{R4} = \frac{R1}{R2}.$$

Для заданной схемы АБУ для дифференциального усилителя  $\frac{R2}{R1} = 7$ . Исходя из условия, что  $R1 \geq R_{\text{вн}}$  или  $R1 \leq R_{\text{н}}$ , где  $R_{\text{н}}$  – минимально допустимое сопротивление нагрузки операционной схемы и может быть принята для большинства ОУ не ниже 5 кОм, определим величину сопротивления R1:

$$R1 \geq R_{\text{вн}} = 10 \text{ кОм}.$$

Таким образом, величина сопротивления R2 равна:

$$R2 = 7R1 = 7 \cdot 10 = 70 \text{ кОм}.$$

Если же выбрать:  $R_1 \cong 5R_n = 5 \cdot 5 = 25 \text{ кОм}$ , то сопротивление R2 будет равно:  
 $R_2 = 7 \cdot 25 = 175 \text{ кОм}$ .

Таким образом, окончательно принимаем величины сопротивлений R1 и R2: 25 и 175 кОм.  
 Величины сопротивлений R3 и R4 для дифференциального усилителя обычно принимают соответственно равными R1 и R2, тогда:  $R_3 = R_1 = 25 \text{ кОм}$ ;  $R_4 = R_2 = 175 \text{ кОм}$ .

### Расчет параметров неинвертирующего масштабного усилителя

Электрическая схема неинвертирующего масштабного усилителя (НМУ) приведена на рисунке 15.

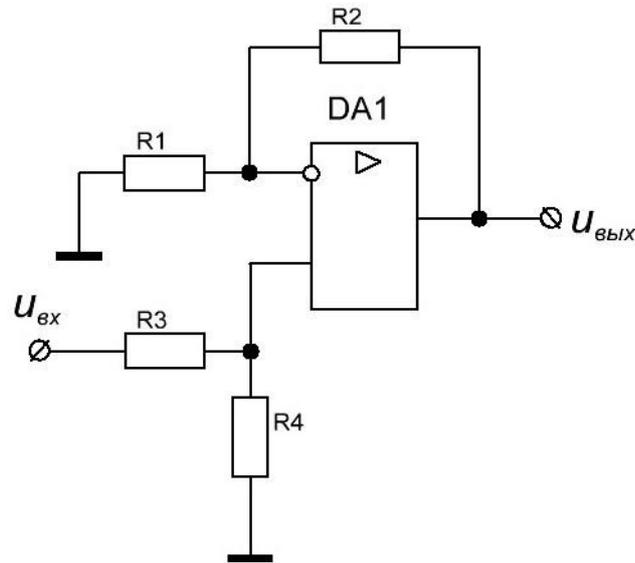


Рисунок 15. Электрическая схема неинвертирующего масштабного усилителя.

Для схемы НМУ справедливо соотношение:

$$u_{\text{вых}} = u_0 K = u_0 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$$u_0 = u_{\text{вх}} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Для заданного АВУ, описанного структурной схемой на рисунке 13 коэффициент передачи НМУ равен 0,5. Это означает, что можно принять для этой схемы  $K = 1$ , а коэффициент передачи входного делителя R3, R4 равным 0,5. Таким образом имеем:

$$1 = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow 0 = \frac{R_2}{R_1};$$

$$0,5 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = \frac{R_4}{R_3 + R_4}.$$

Из вышеприведенных соотношений принимаем:

$$R_2 = 0; R_1 \rightarrow \infty$$

$$R_3 = R_4.$$

Сопротивление R1 можно принять порядка  $1 \div 5 \text{ МОм}$ , а сопротивление R2 шунтируется.

Для схемы рисунка 14 входное сопротивление равно:

$$R_{\text{вх}} = R_3 + R_4 = 2R_3,$$

следовательно, сопротивления R3, R4 будут равны:

$$R_3 = R_4 = \frac{R_{\text{вх}}}{2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ кОм}.$$

## Расчет параметров инвертирующего сумматора

Электрическая схема инвертирующего сумматора для 3-х входных сигналов изображена на рисунке 16.

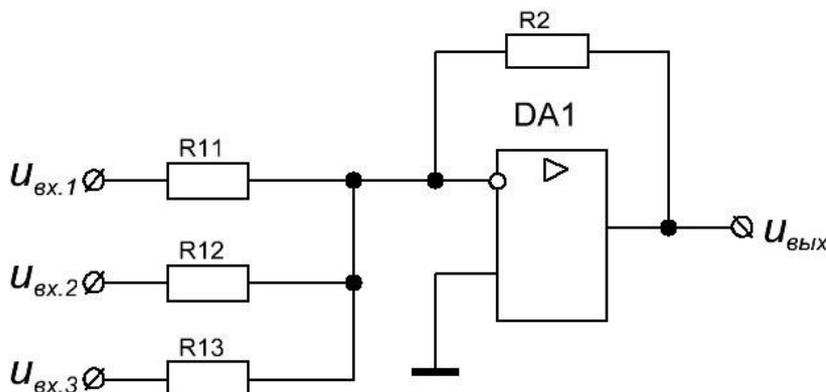


Рисунок 16. Электрическая схема инвертирующего сумматора.

Параметры инвертирующего сумматора можно определить аналогично таковым для инвертирующего усилителя, пользуясь следующими условиями:

$$R_{1n} \cong R_{\text{вых}}; R_{1n} \cong 5R_n$$

Если, как и для параметров схем рассчитанных ранее, принять минимальное сопротивление нагрузки операционной схемы равное 5 кОм, то сопротивления  $R_{1n}$  схемы, подключенные к входным зажимам, будут равны:

$$R_{1n} = 5 \cdot R_n = 5 \cdot 5 = 25 \text{ кОм}$$

Поскольку коэффициент передачи сумматора равен 1, то сопротивление  $R_2$  будет равно по величине сопротивлениям  $R_{1n}$ .

## Выбор типа операционного усилителя

Выбор типа операционного усилителя для элементов АВУ базируется на величинах максимального выходного напряжения  $U_{\text{вых. max}}$  и скорости его нарастания:

$$v_{U_{\text{вых}}} = \left( \frac{dU_{\text{вых. max}}}{dt} \right)_{\text{max}}$$

Для заданного АВУ в наиболее жестком режиме работает инвертирующий сумматор (согласно стр. схеме рис. 13), поскольку на его выходе формируется величина  $Y$ . Поэтому произведем выбор ОУ для этого элемента, а ОУ для остальных схем примем таким же.

Максимальное значение выходного сигнала АВУ определяется выражением:

$$Y_m = |x_1| + |x_2| + |x_3| = 0,8 + 0,7 + 0,5 + 0,8 = 1,7 \text{ В}$$

Максимальная скорость нарастания выходного сигнала можно определить по выражению:

$$v_{U_{\text{вых}}} = \left( \frac{dY}{dt} \right)_{\text{max}} = 2\pi f_m Y_m = 2\pi \cdot 11000 \cdot 1,7 = 8,086 \times 10^5 \text{ В/с} = 0,809 \text{ В/мкс}$$

Рассчитанным значениям максимального выходного сигнала и максимальной скорости его нарастания наиболее близко удовлетворяет операционная схема типа К140УД6 или К1408УД1, имеющие соответствующие параметры выбора [4]:

$$\text{К140УД6: } U_{\text{вых}} \cong 12 \text{ В; } v_{U_{\text{вых}}} \cong 2,5 \text{ В/мкс};$$

$$\text{К1408УД1: } U_{\text{вых}} \cong 11 \text{ В; } v_{U_{\text{вых}}} \cong 2,5 \text{ В/мкс}.$$

Полная электрическая схема рассчитанного АВУ представлена на рисунке 17.

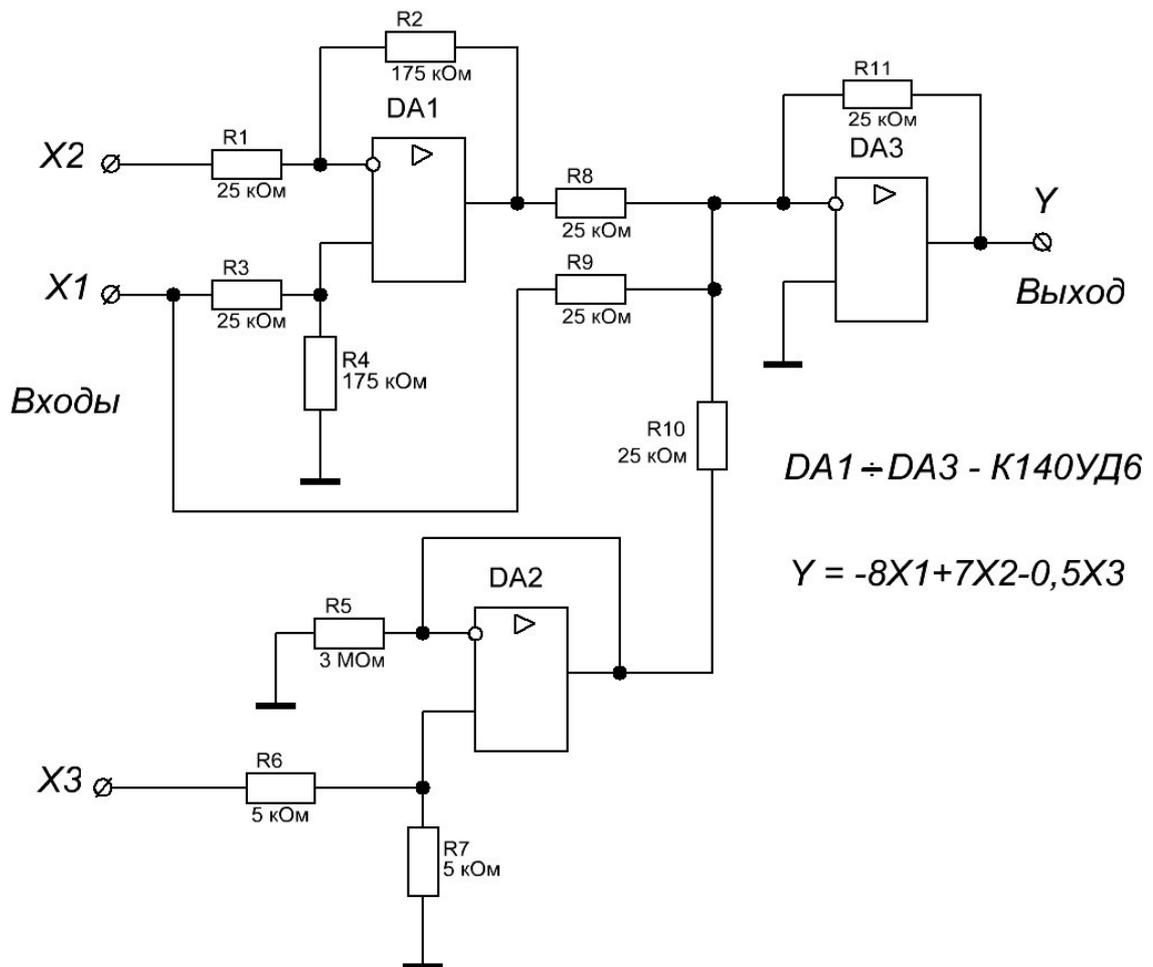


Рисунок 17. Полная электрическая схема АВУ, предназначенная для вычисления выражения  $Y = -8X1 + 7X2 - 0,5X3$ .

## ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. Учебник для вузов. М., «Энергия», 1969.
2. Горбачев Г. Н., Чаплыгин Е. Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов/Под ред. В. А. Лабунцова.- М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.: ил.
3. Забродин Ю. С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с., ил.
4. Методические указания к выполнению контрольных работ (уточнить полное название!).