

Дисциплина «Методы анализа и расчета электронных схем»

ТЕМА: «Топологические модели электронных схем
(схемы замещения электронных цепей по
постоянному и переменному току)»

Легостаев Николай Степанович,
доцент кафедры «Промышленная электроника»

По форме представления различают следующие

виды топологических моделей электронных цепей (схем):

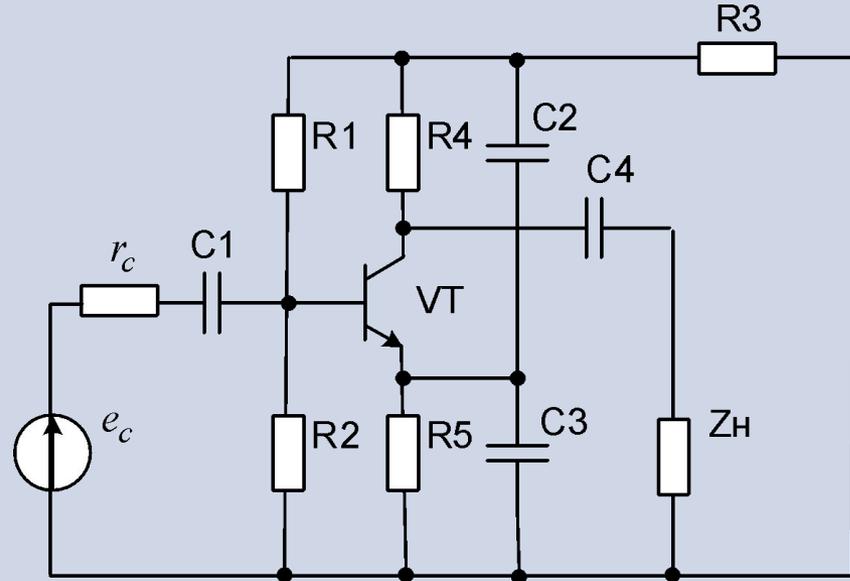
1. Схемы замещения.
2. Полюсные графы.
3. Топологические матрицы.
4. Топологические уравнения.

Под топологической моделью электронной схемы понимают удобное для анализа изображение входящих в нее компонентов и их взаимных соединений.

Виды топологических моделей электронных цепей (схем):

Виды топологических
моделей электронных
цепей (схем):

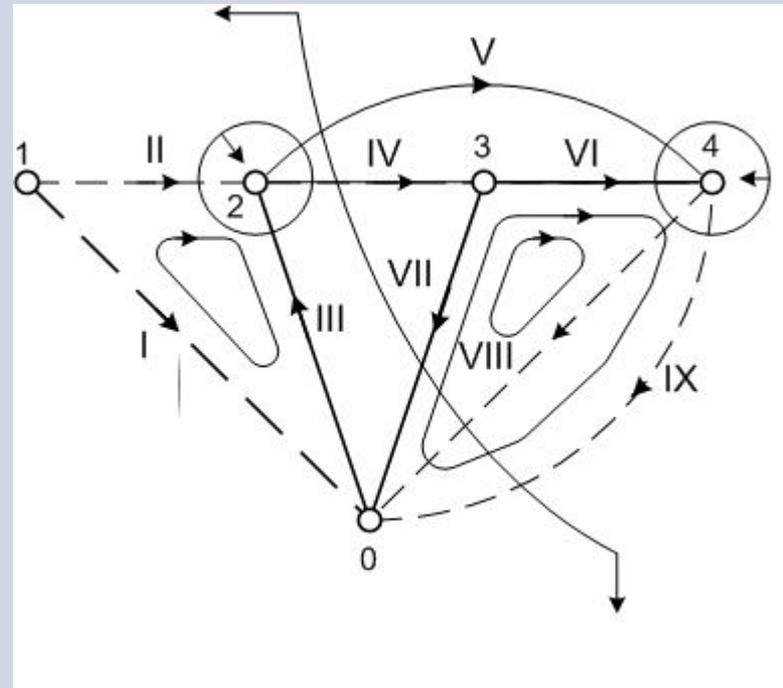
Схемы замещения



Виды топологических моделей электронных цепей (схем):

Виды топологических моделей
электронных цепей (схем):

Полюсные графы.



Виды топологических моделей электронных цепей (схем):

Виды топологических моделей электронных цепей (схем):	
Топологические матрицы	$A = \begin{matrix} & \text{I} & \text{II} & \text{III} & \text{IV} & \text{V} & \text{VI} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 0 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$
Топологические уравнения	$\begin{bmatrix} \bar{1} & \pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho^T \\ \bar{1} \end{bmatrix} = \bar{0}$

Топологические модели электронных цепей (схем)

При анализе **линейных непрерывных электронных схем** наиболее известным приемом упрощения является составление нескольких топологических моделей исследуемой цепи: топологической модели по **постоянному току** и топологической модели по **переменному току**.

Возможность применения данного подхода основана на справедливости для линейных электронных цепей **принципа суперпозиции (наложения)**, согласно которому **реакция линейной схемы на действие суммы возмущений равна сумме реакций на действие каждого возмущения в отдельности**.

Топологические модели электронных цепей (схем).

Принцип суперпозиции (наложения).

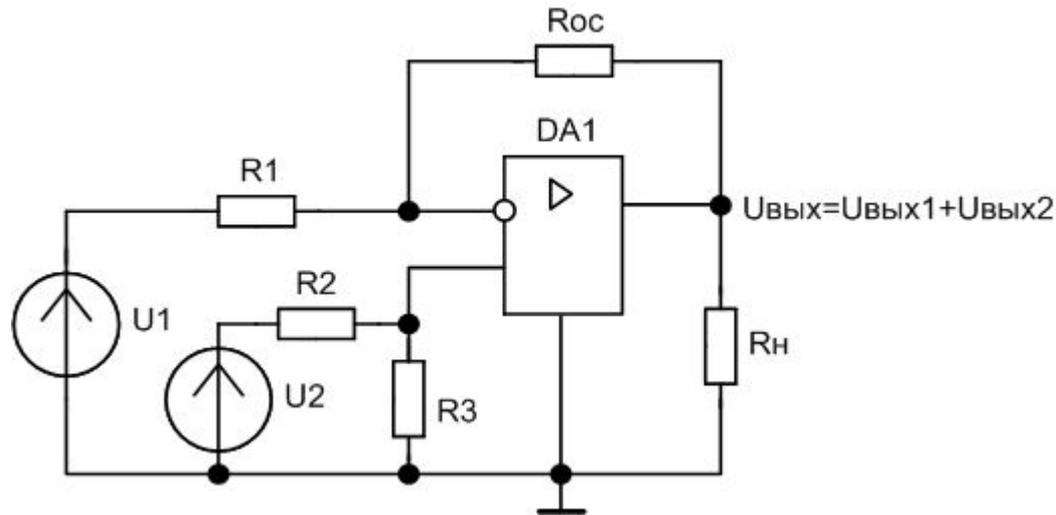


Рис. 1.1,а – Схема усилителя с двумя возмущения на входе

U_1 – возмущение 1.

U_2 – возмущение 2.

$U_{\text{вых.}} = (U_{\text{вых.1}} + U_{\text{вых.2}})$ – сумма реакций на действие каждого возмущения в отдельности

Топологические модели электронных цепей (схем).

Принцип суперпозиции (наложения).

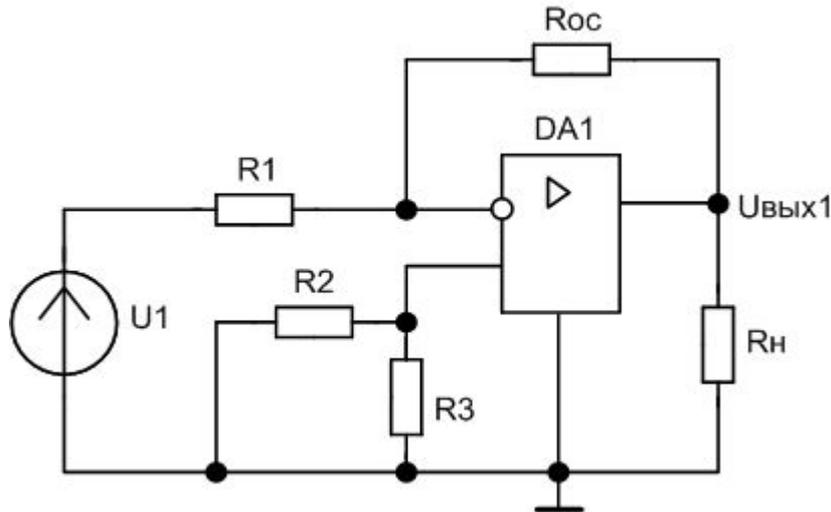


Рис. 1.1,б – Схема усилителя с возмущением U_1 на входе ($U_2=0$).

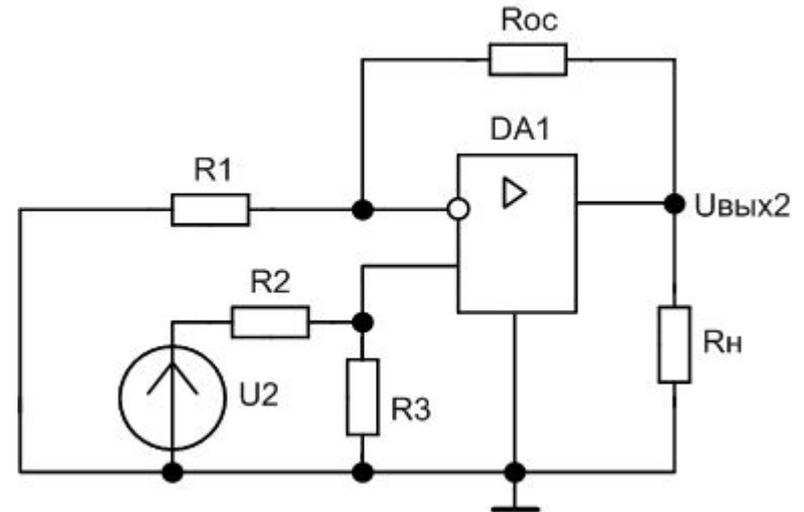
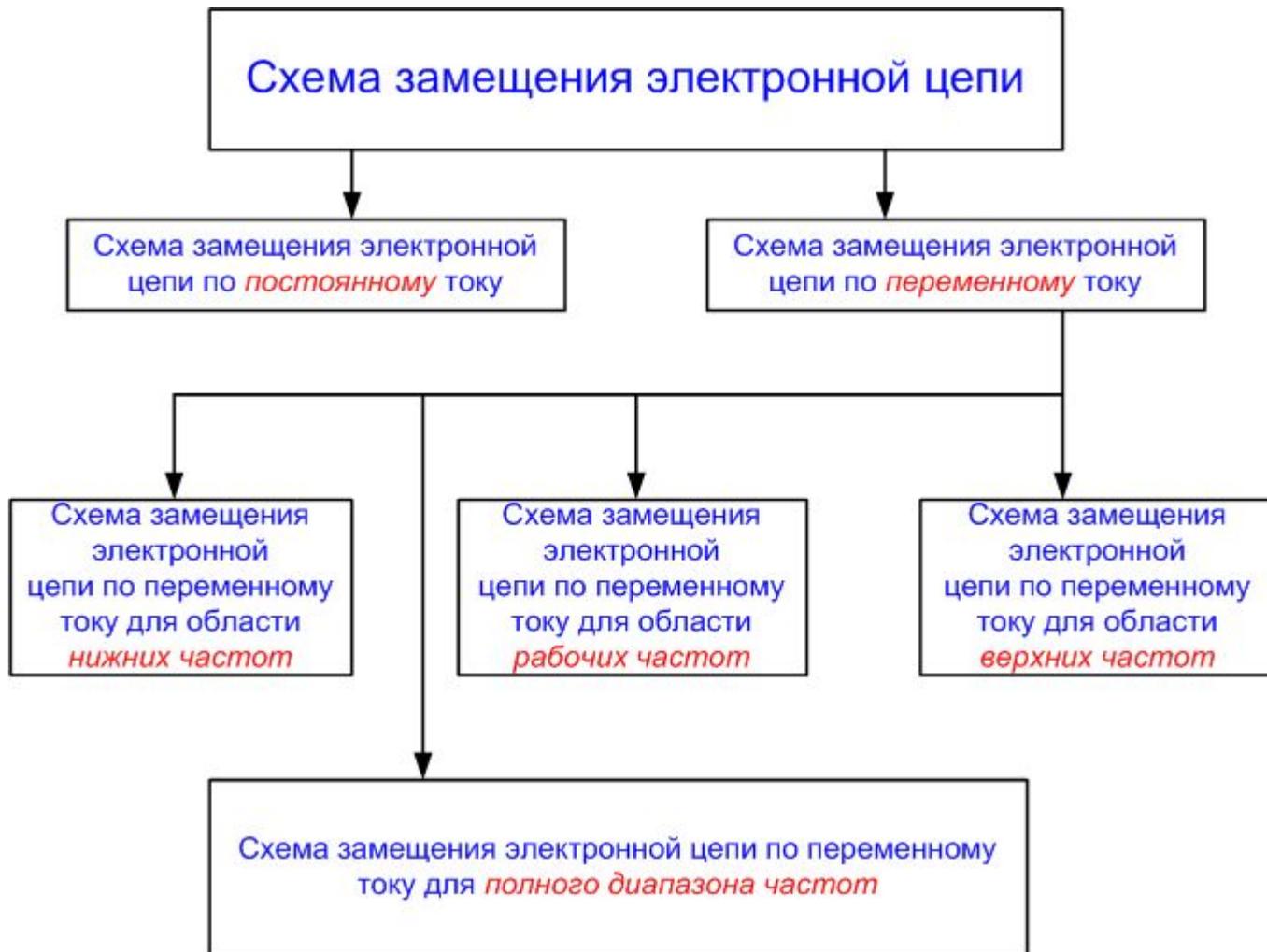


Рис. 1.1,в – Схема усилителя с возмущением U_2 на входе ($U_1=0$).

$U_{вых.1}$ – реакция схемы на возмущение U_1 .

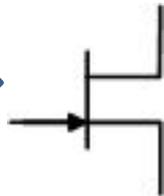
$U_{вых.2}$ – реакция схемы на возмущение U_2 .

Схемы замещения электронной цепи

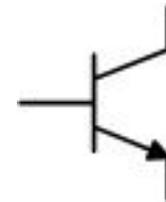
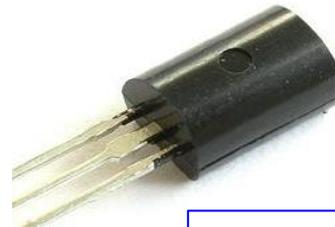


Схемы замещения электронной цепи

Схема замещения электронной цепи – это геометрическая абстракция цепи, отражающая ее структуру и характер входящих в нее компонентов с учетом режима работы, постановки задачи исследования и требуемой точности.



Полевой
транзистор



Биполярный
транзистор



Конденсато
р



Резисто
р

Схемы замещения электронной цепи по постоянному току

Цель анализа цепи по постоянному току состоит в получении зависимостей токов и напряжений на полюсах электронных компонентов от параметров пассивных компонентов и величин источников постоянного тока. Далее по этим зависимостям проводится расчет параметров пассивных компонентов, обеспечивающих заданный режим работы (положения рабочей точки) каждой электронной компоненты.

Топологическая модель цепи по постоянному току получают путем исключения из исходной схемы:

- емкостных элементов путем разрыва;
- индуктивных элементов путем закорачивания;
- источников переменного тока путем разрыва;
- источников переменной ЭДС путем закорачивания.

Схемы замещения электронной цепи по постоянному току

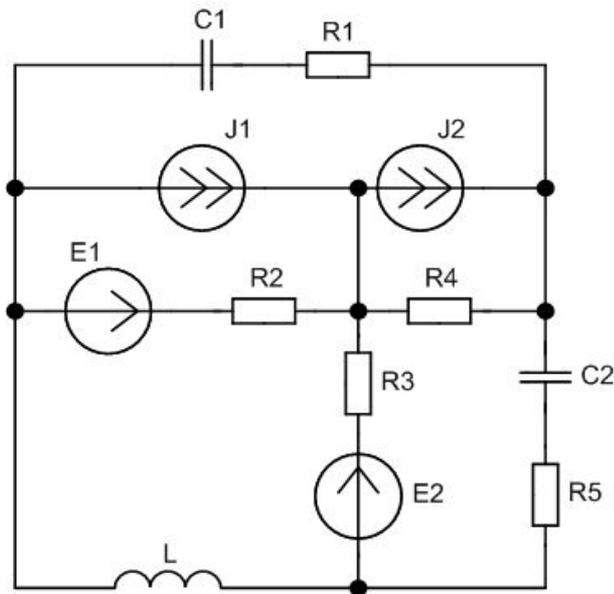
При анализе **измерительных цепей** иногда учитывают паразитные сопротивления реактивных компонентов с целью исследования погрешностей, вносимых цепями с реактивными компонентами.

К изображению топологических моделей предъявляются определенные **требования**:

- изображать схему без пересечения линий (по возможности);
- не показывать слишком длинных линий (не обоснованно длинных линий), изображающих, допустим, базисный узел схемы.

Схемы замещения электронной цепи по постоянному току

Пример построения топологической модели электронной схемы (рис. 1.2,а)



$$J_1 = 5 \sin(314t) \text{ A}; \quad J_2 = 14 \text{ A};$$
$$E_1 = 12 \text{ V}; \quad E_2 = 10 \cos(628t) \text{ V}.$$

Рис. 1.2,а – Схема электронной цепи

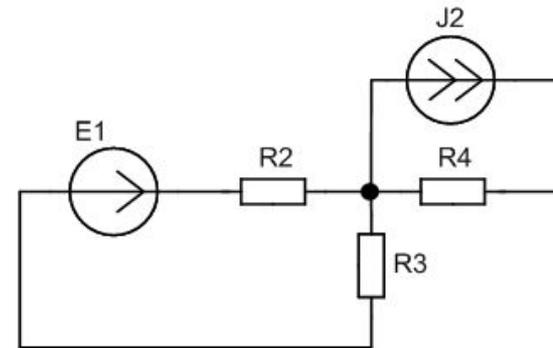


Рис. 1.2,б – Схема замещения электронной цепи рис.1.2,а по постоянному току

Схемы замещения электронной цепи по постоянному току

Пример построения топологической модели электронной схемы (рис. 1.3,а)

по постоянному току.

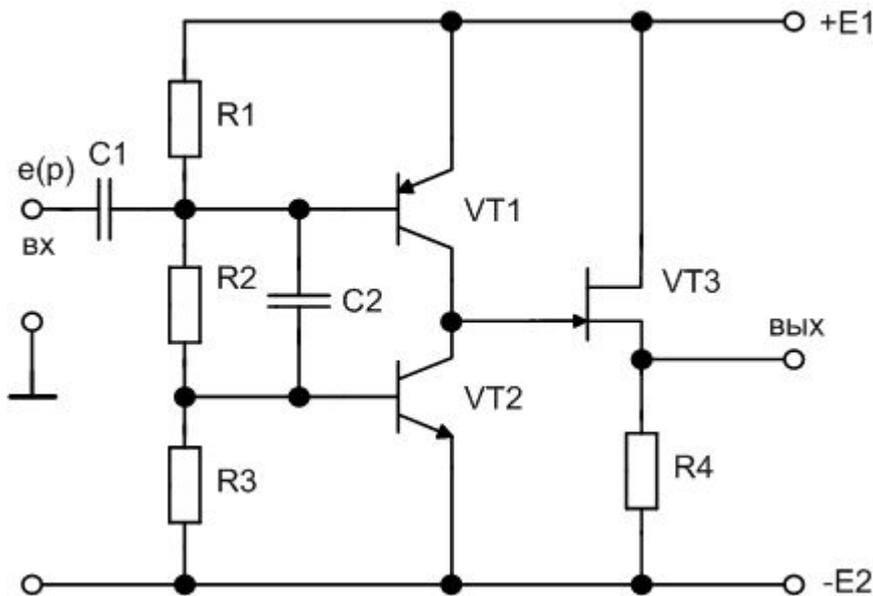


Рис. 1.3,а – Схема электронной цепи

В соответствии с правилами построения топологических моделей электронных схем по постоянному току из принципиальной схемы рис.1.3,а исключаем путем разрыва ветви, содержащие конденсаторы $C1$ и $C2$. Источники энергии $E1$ и $E2$ в топологической модели по постоянному току представлены идеальными источниками ЭДС $E1$ и $E2$ и сопротивлениями $R1$ и $R2$ соответственно. В результате получаем топологическую модель по постоянному току, представленную схемой рис. 1.3,б.

Схемы замещения электронной цепи по постоянному току

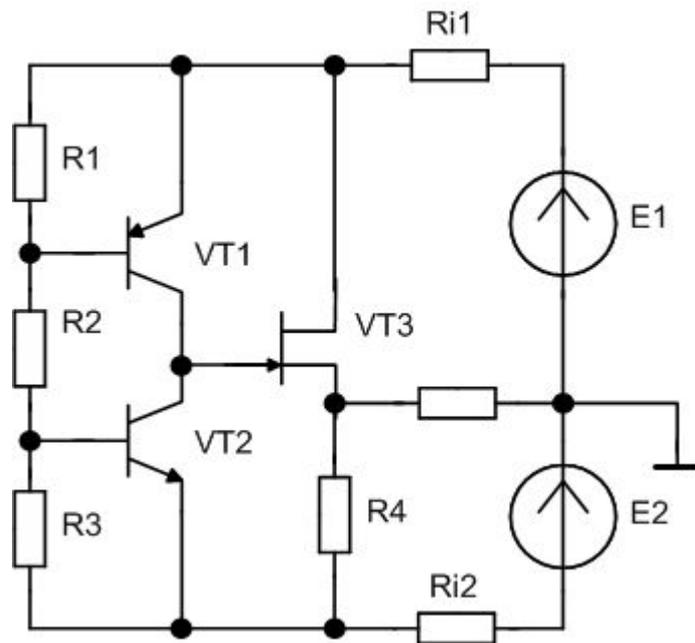


Рис. 1.3,б – Схема электронной цепи рис.1.3,а по постоянному току.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Топологические модели электронных схем по переменному току составляют с целью определения схемных функций, динамических характеристик и малосигнальных параметров электронных схем.

Топологические модели по переменному току получают исключением из исходной электронной схемы:

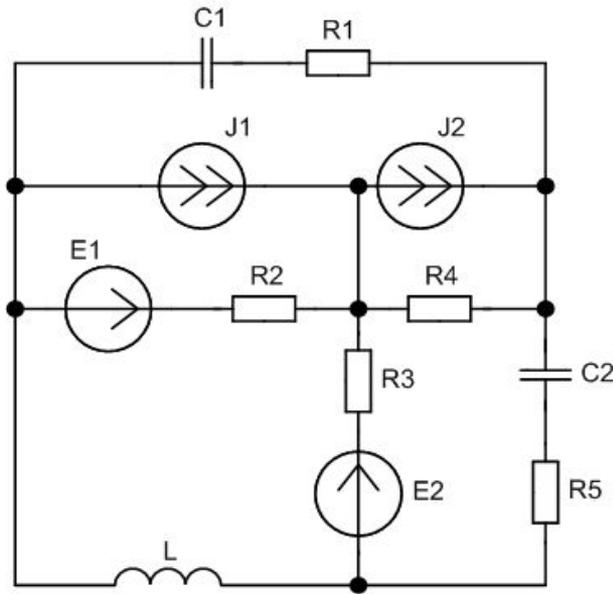
- источников постоянной ЭДС **путем закорачивания**;
- источников постоянного тока **путем разрыва**;
- емкостных и индуктивных элементов **путем закорачивания**, если в рассматриваемом диапазоне частот их сопротивление переменному току сравнительно мало;
- индуктивных элементов **путем разрыва**, если в рассматриваемом диапазоне частот их сопротивление переменному току сравнительно велико.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

При составлении топологической модели по переменному току необходимо стремиться к максимально возможному упрощению и наглядности. Это имеет существенное значение для ускорения анализа и расчета электронной схемы.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Пример построения топологической модели электронной схемы (рис. 1.4,а)



$$J_1 = 5 \sin(314t) \text{A}; \quad J_2 = 14 \text{A};$$
$$E_1 = 12 \text{В}; \quad E_2 = 10 \cos(628t) \text{В}.$$

Рис. 1.4,а – Схема электронной цепи

В соответствии с правилами построения топологических моделей электронных цепей по переменному току из схемы рис. 1.4,а исключаем элементы: источник постоянного тока **J2** путем **разрыва**, источник постоянной ЭДС **E1** путем **закорачивания**. Так как параметры пассивных элементов схемы **не заданы**, емкости **C1, C2** и индуктивность **L** в топологической модели по переменному току **следует оставить**.

В результате получаем топологическую модель по переменному току, представленную на рис. 1.4,б.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

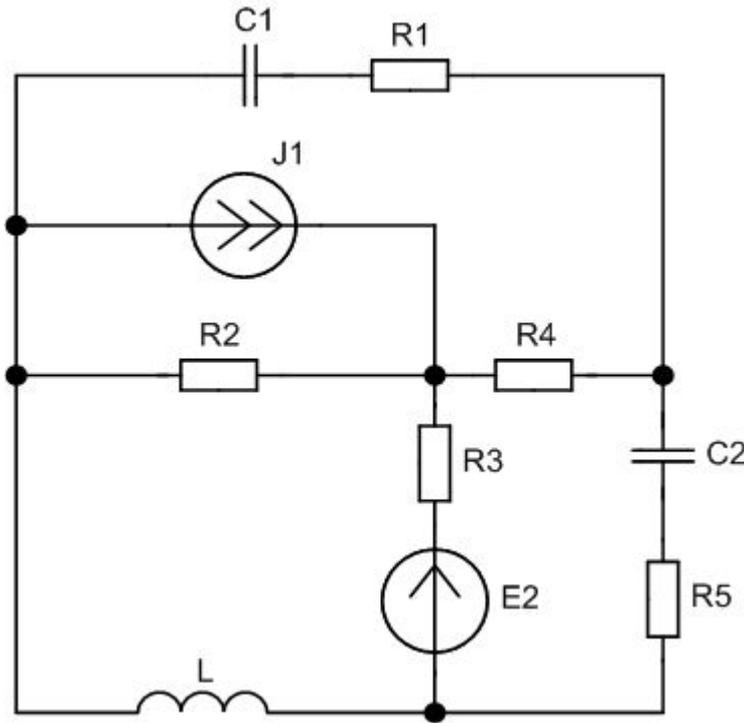


Рис. 1.4,б – Вариант топологической модели по переменному току схемы рис. 1.4,а.

С целью **упрощения** реактивные элементы схемы рис. 1.4,б представляем сопротивлениями в операторной форме Z_{C1} , Z_{C2} , Z_L и заменяем последовательно включенные резистор R1 и конденсатор C1 резистором $Z_{\Theta 1}$, а последовательно включенные резистор R5 и конденсатор C2 – резистором $Z_{\Theta 2}$.

$$Z_{C1} = \frac{1}{pC_1}; \quad Z_{C2} = \frac{1}{pC_2}; \quad Z_L = pL;$$

$$Z_{\dot{Y}1} = \left(R_1 + \frac{1}{pC_1} \right); \quad Z_{\dot{Y}2} = \left(R_5 + \frac{1}{pC_2} \right).$$

Окончательный вариант топологической модели по переменному току для схемы рис. 1.4,а представлен на рис. 1.4,в.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

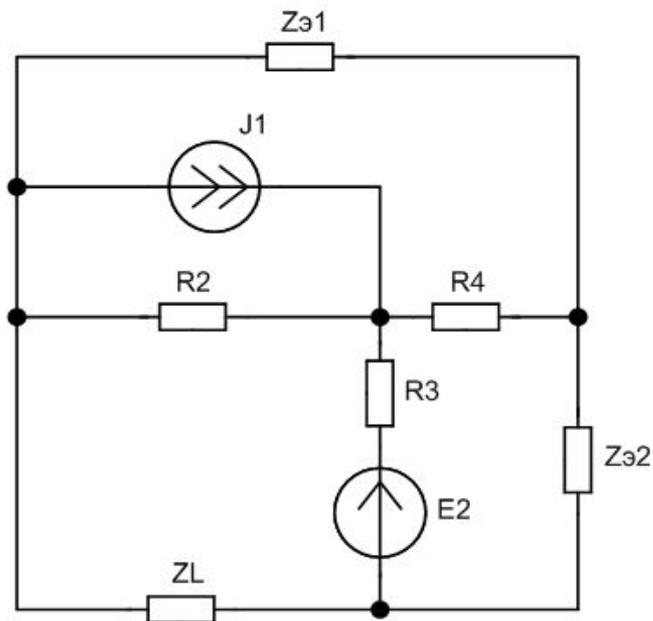


Рис. 1.4,в – Окончательный вариант топологической модели по переменному току схемы рис. 1.4,а.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для полного диапазона частот

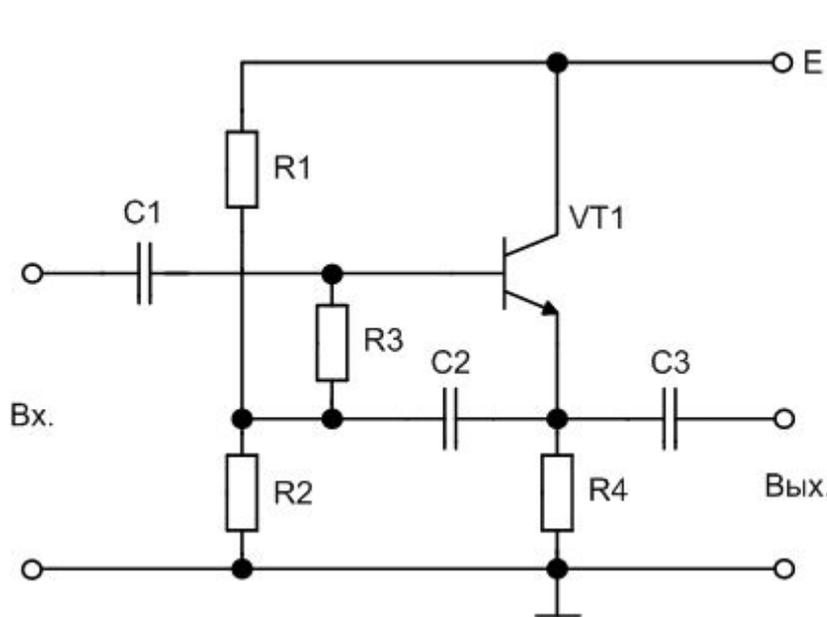


Рис.1.5,а – Исходная схема усилителя

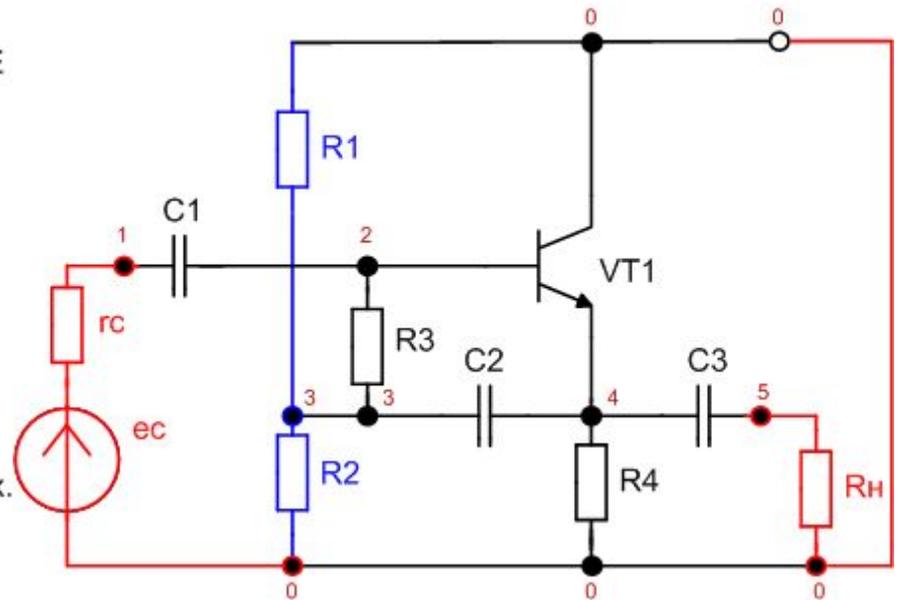
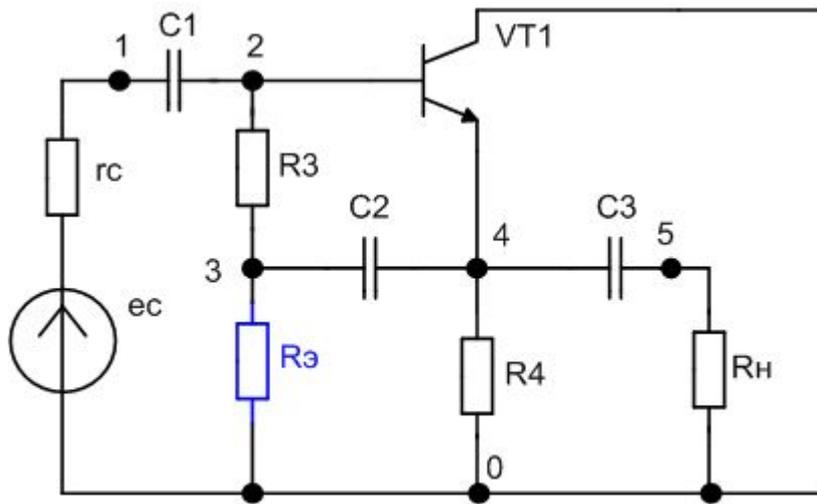


Рис. 1.5,б – Схема замещения усилителя рис.1.5,а для полного диапазона частот

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для полного диапазона частот



$$R_{\text{э}} = R_1 * R_2 / (R_1 + R_2)$$

Рис.1.5,в – Схема замещения (усилителя рис. 1.5,а) по переменному току для полного диапазона частот, в которой активный электронный компонент (биполярный транзистор) представлен своим условным графическим обозначением (УГО)

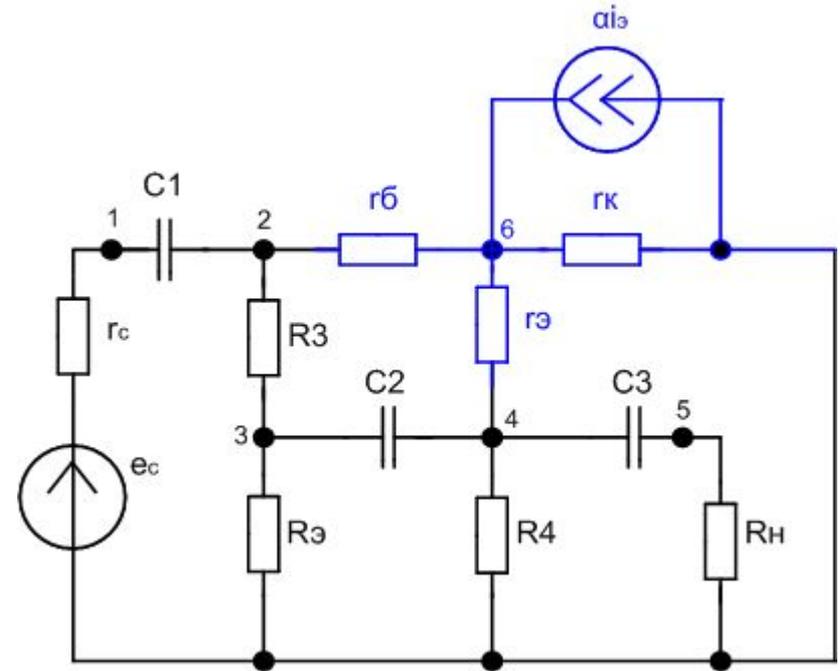


Рис.1.5, г – Схема замещения (усилителя рис. 1.5,а) по переменному току для полного диапазона частот, в которой активный электронный компонент (биполярный транзистор) представлен эквивалентной схемой

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

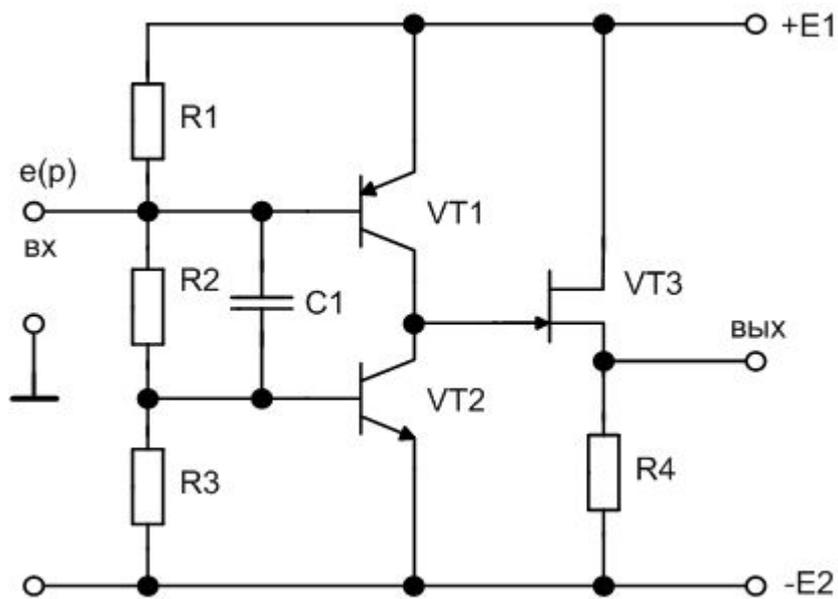


Рис.1.6,а – Исходная схема усилителя

При составлении топологической модели по переменному току для рабочего диапазона частот исключаем из принципиальной схемы источники энергии $E1$ и $E2$ путем закорачивания. Источник входного сигнала в топологической модели по переменному току представляем идеальным источником переменной ЭДС $e(p)$ с последовательно включенным сопротивлением r_i .

Конденсатор $C1$ в рабочем диапазоне частот обладает малым сопротивлением переменному току, вследствие чего его можно закоротить. В результате получаем топологическую модель по переменному току, представленную схемой рис.1.6,б.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

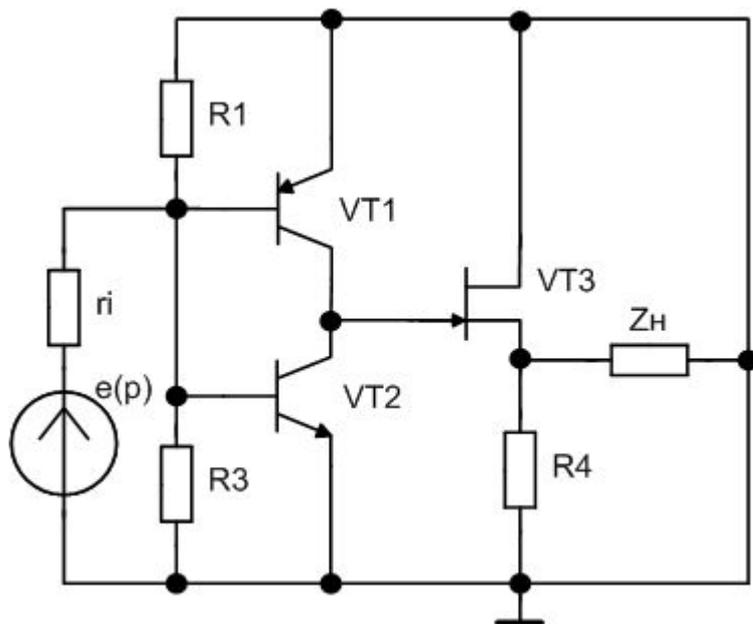


Рис.1.6,б – Схема замещения (усилителя рис. 1.6,а) по переменному току для рабочего диапазона частот

С целью упрощения и избавления от изображения общего узла в виде сверхдлинной линии (почти вокруг схемы) и от схемы рис.1.6,б переходим к схеме рис.1.6,в, в которой параллельно включенные сопротивления R_1 и R_3 представлены одним сопротивлением $R_э$.

$$R_э = R_1 \parallel R_3 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$$

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

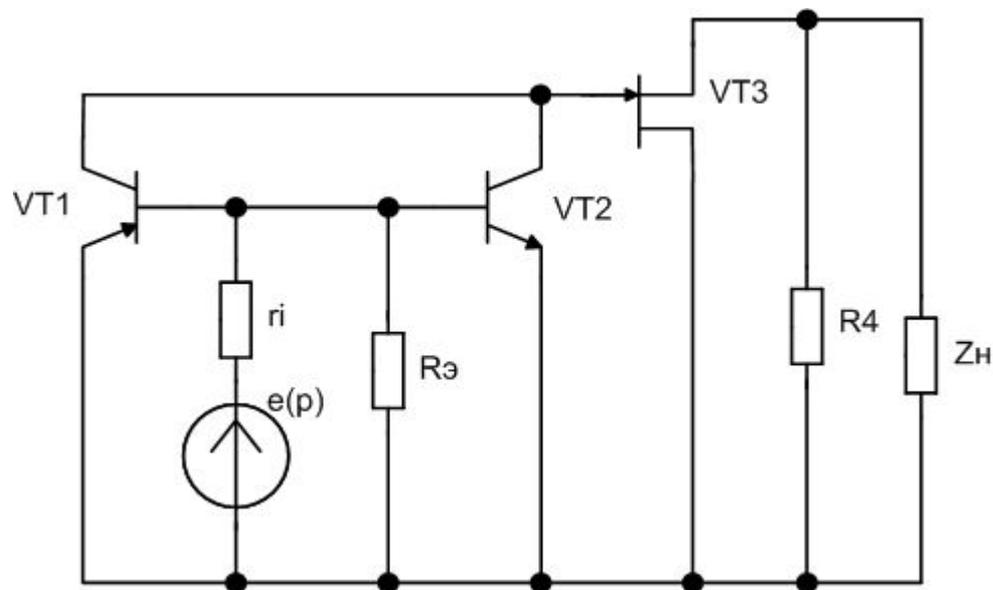


Рис.1.6,в – Схема замещения (усилителя рис. 1.6,а) по переменному току для рабочего диапазона частот

Вопрос 1. Укажите в порядке возрастания номеров действия, направленные на формирование схемы замещения эмиттерного повторителя по переменному току *для рабочего диапазона частот*

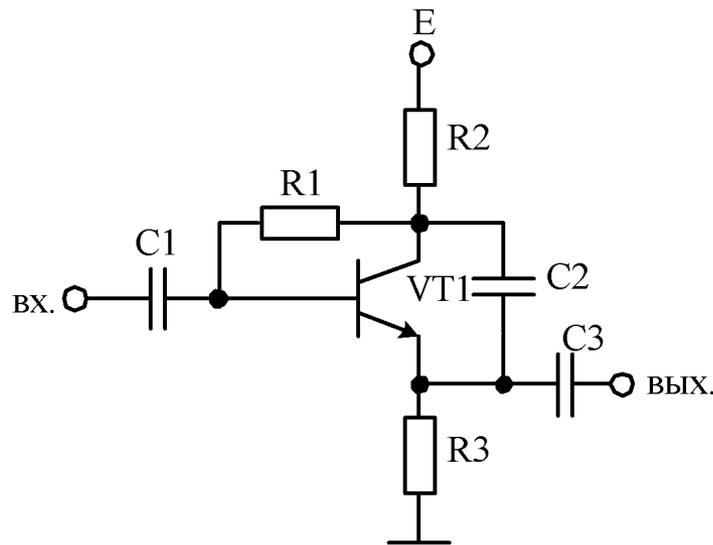


Рис.
В.1

- 1 – Закоротить источник питания Е
- 2 – Разомкнуть ветвь источника питания Е
- 3 – Закоротить конденсатор С1
- 4 – Разомкнуть ветвь конденсатора С1
- 5 – Закоротить конденсатор С2
- 6 – Разомкнуть ветвь с конденсатором С2
- 7 – Закоротить конденсатор С3
- 8 – Разомкнуть ветвь с конденсатором С3
- 9 – Представить ветви с резисторами R2 и R3 эквивалентным сопротивлением

$$R_{\dot{y}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

- 10 – Представить ветви с резисторами R2 и R3 эквивалентным сопротивлением

$$R_{\dot{y}} = R_2 + R_3.$$

Вопрос 1. Укажите в порядке возрастания номеров действия, направленные на формирование схемы замещения эмиттерного повторителя по переменному току *для рабочего диапазона частот*

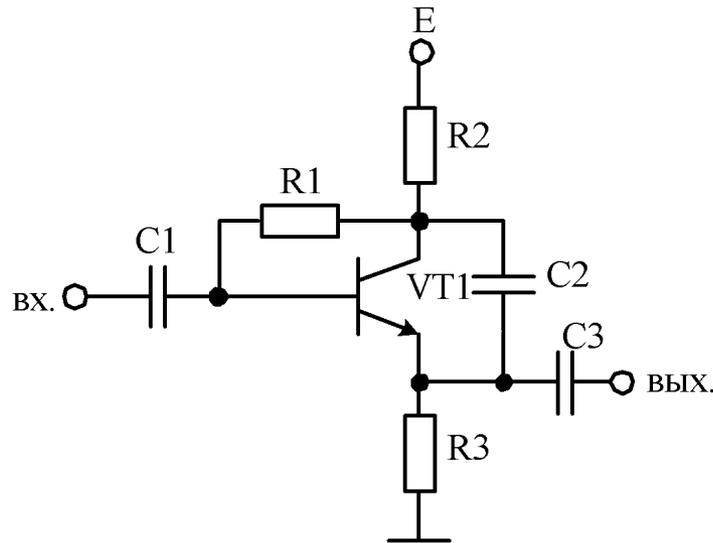


Рис.
В.1

- 1 – Закоротить источник питания Е
- 2 – Разомкнуть ветвь источника питания Е
- 3 – Закоротить конденсатор С1
- 4 – Разомкнуть ветвь конденсатора С1
- 5 – Закоротить конденсатор С2
- 6 – Разомкнуть ветвь с конденсатором С2
- 7 – Закоротить конденсатор С3
- 8 – Разомкнуть ветвь с конденсатором С3
- 9 – Представить ветви с резисторами R2 и R3 эквивалентным сопротивлением

$$R_{\dot{y}} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

- 10 – Представить ветви с резисторами R2 и R3 эквивалентным сопротивлением

$$R_{\dot{y}} = R_2 + R_3.$$

Правильный ответ : **1,3,5,7,9.**

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

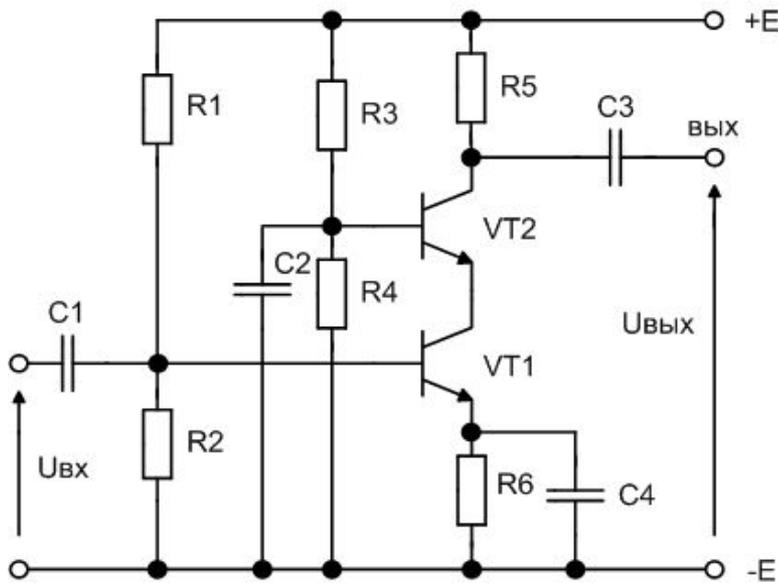
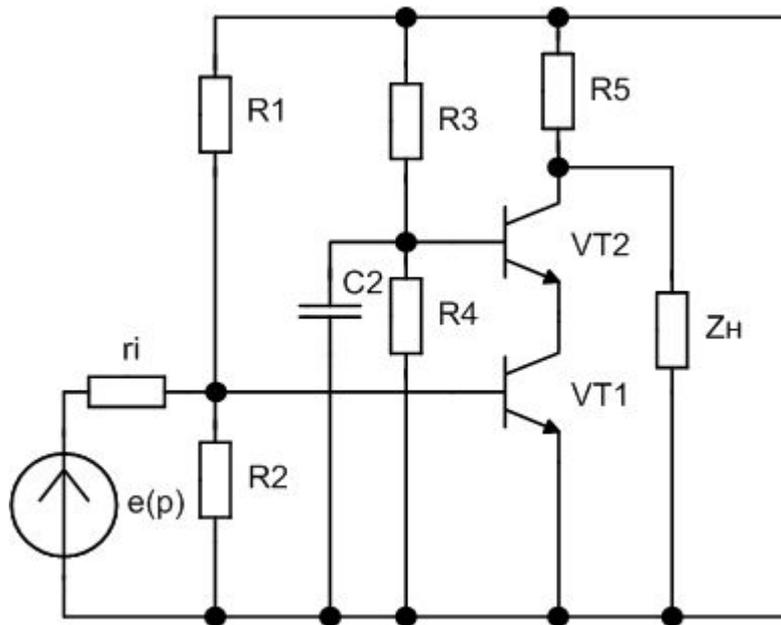


Рис.1.7,а – Исходная схема усилителя

При составлении топологической модели по переменному току исключаем из принципиальной схемы источник энергии E путем закорачивания. Источник входного сигнала в топологической модели по переменному току представляем идеальным источником переменной ЭДС $e(p)$ с последовательно включенным сопротивлением r_i . Конденсаторы $C1, C3, C4$ закорачиваем. Конденсатор $C2$ в топологической модели по переменному току оставляем с целью исследовать его влияние на частоте характеристики схемы. В результате получаем топологическую модель по переменному току рис.1.7,б.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот



Данная модель является неоптимальной, так как содержит избыточное количество контуров и пересечение ветвей.

Устраняя пересечения в схеме рис.1.7,б, переходим к схеме рис.1.7, в, а объединяя параллельно включенные элементы к схеме рис.1.7,г.

Рис.1.7,б – Схема замещения (усилителя рис. 1.4,а) по переменному току для рабочего диапазона частот

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

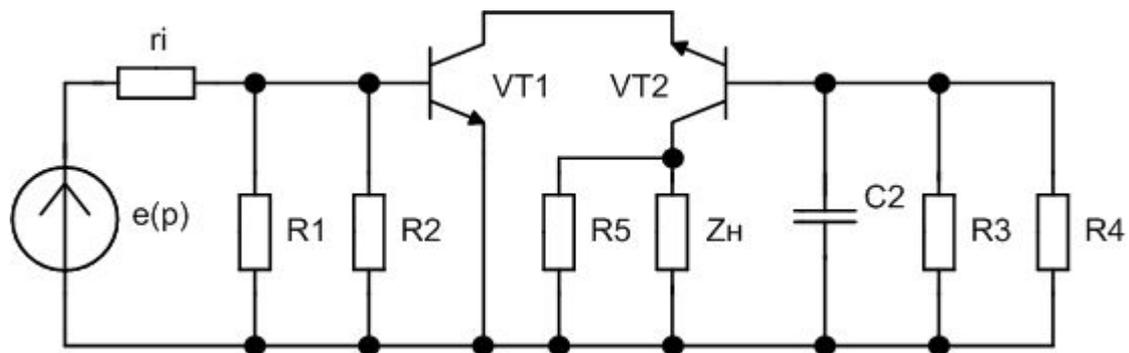


Рис.1.7,в – Схема замещения (усилителя рис. 1.7,а) по переменному току для рабочего диапазона частот

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

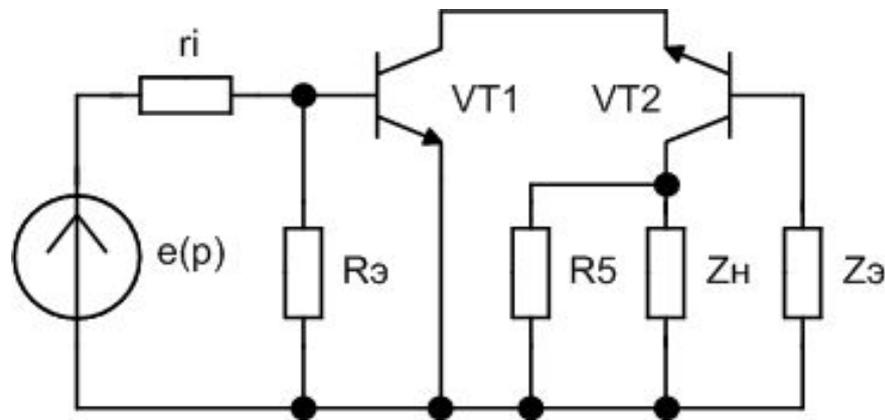


Рис.1.7,г – Схема замещения (усилителя рис. 1.7,а) по переменному току для рабочего диапазона частот

Недостаток топологической модели рис. 1.7,г состоит в том, что сопротивление нагрузки принадлежит двум контурам, а это, как правило, приводит к увеличению объема вычислений при определении выражений схемных функций. Оптимальная топологическая модель схемы по переменному току приведена на рис.1.7,д.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

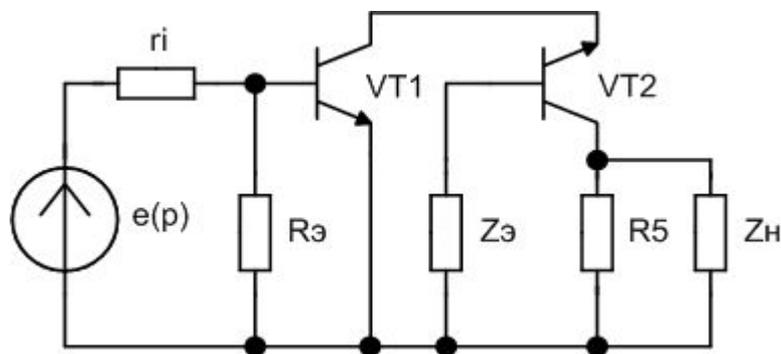


Рис.1.7,д – Оптимальная схема замещения (усилителя рис. 1.7,а) по переменному току для рабочего диапазона частот

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

Вопрос 2. Для схемы рис.1.7,г укажите формулы для эквивалентного резистора $R_{\dot{z}}$ и эквивалентного резистора $Z_{\dot{z}}$.

Варианты ответов для вопроса 2:

1)
$$Z_{\dot{y}} = \frac{\frac{R_3 + R_4}{R_3 \cdot R_4} \times \frac{1}{pC_2}}{\frac{R_3 + R_4}{R_3 \cdot R_4} + \frac{1}{pC_2}};$$

2)
$$Z_{\dot{y}} = \frac{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \times pC_2}{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + pC_2};$$

3)
$$R_{\dot{y}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2};$$

4)
$$Z_{\dot{y}} = \frac{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \times \frac{1}{pC_2}}{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + \frac{1}{pC_2}};$$

5)
$$R_{\dot{y}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2};$$

6)
$$R_{\dot{y}} = R_1 + R_2;$$

Схемы замещения электронной цепи по переменному току для рабочего диапазона частот

Вопрос 2. Для схемы рис.1.7,г укажите формулы для эквивалентного резистора $R_{\dot{z}}$ и эквивалентного резистора $Z_{\dot{z}}$.

Варианты ответов для вопроса 2:

1)
$$Z_{\dot{y}} = \frac{\frac{R_3 + R_4}{R_3 \cdot R_4} \times \frac{1}{pC_2}}{\frac{R_3 + R_4}{R_3 \cdot R_4} + \frac{1}{pC_2}};$$

2)
$$Z_{\dot{y}} = \frac{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \times pC_2}{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + pC_2};$$

3)
$$R_{\dot{y}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2};$$

4)
$$Z_{\dot{y}} = \frac{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \times \frac{1}{pC_2}}{\frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} + \frac{1}{pC_2}};$$

5)
$$R_{\dot{y}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2};$$

6)
$$R_{\dot{y}} = R_1 + R_2;$$

Правильный ответ: формула 3 и формула 4.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Вопрос 3. Для схемы рис. В.3 укажите количество узлов.

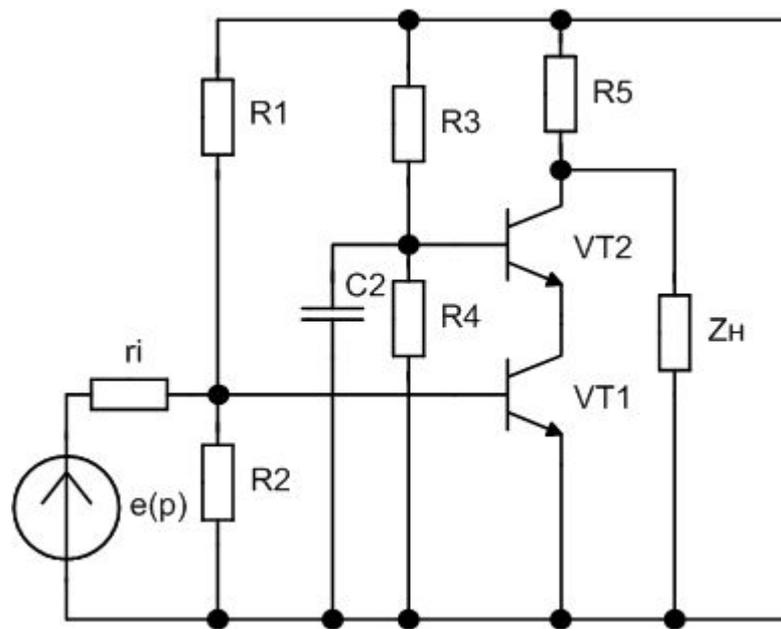


Рис. В.3 – Схема замещения электронной схемы по переменному току

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Вопрос 3. Для схемы рис. В.3 укажите количество узлов.

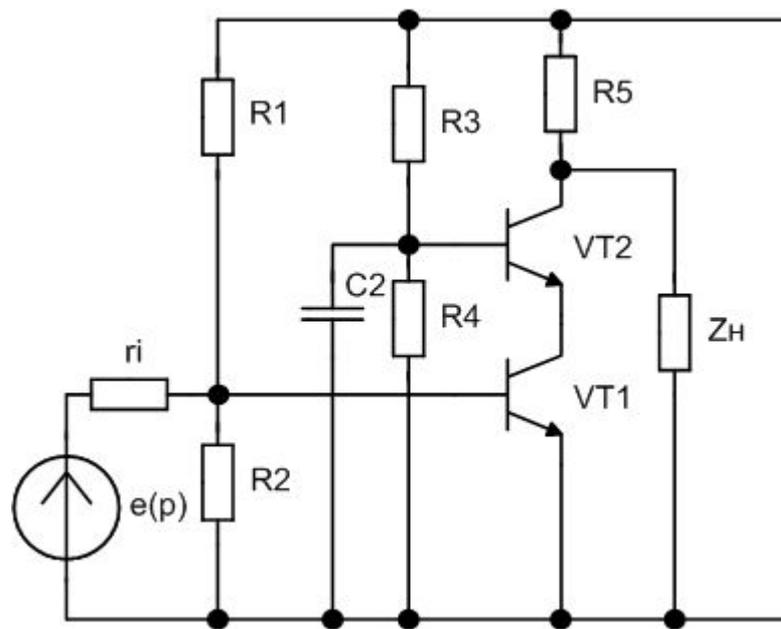


Рис. В.3 – Схема замещения электронной схемы по переменному току

Правильный ответ: **5 узлов.**

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

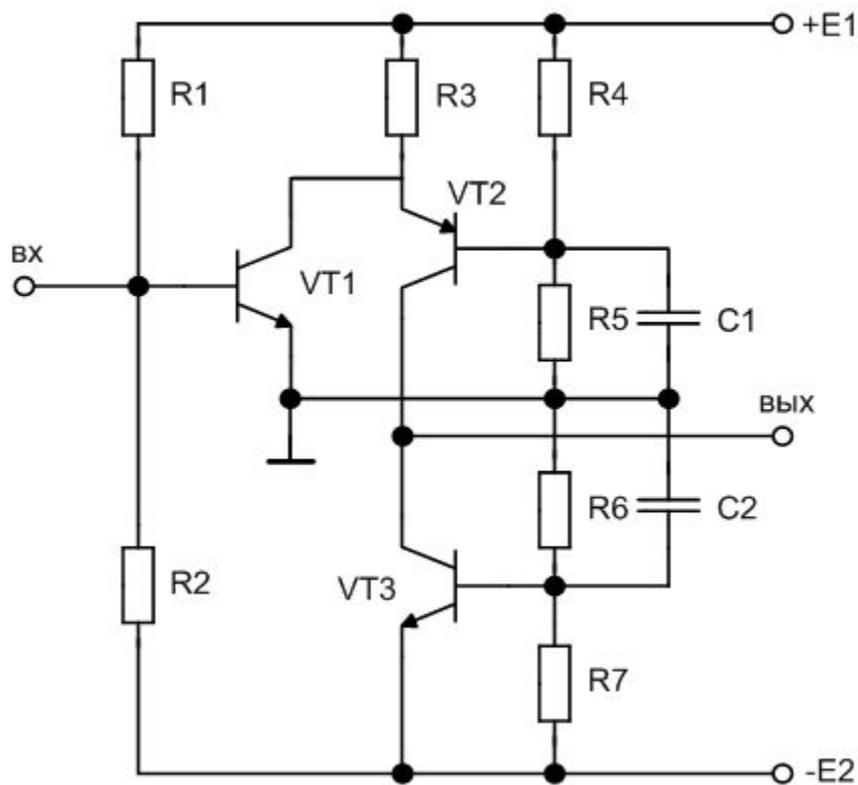


Рис.1.8,а – Схема усилителя

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

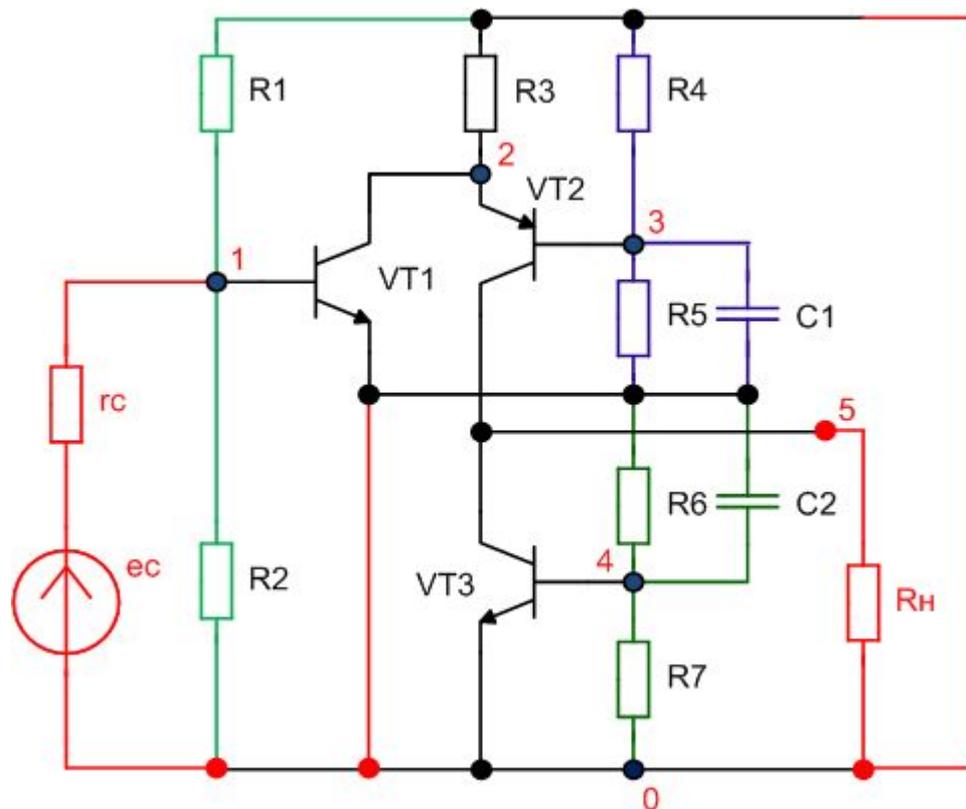


Рис.1.8,б – Вариант 1 схемы замещения по переменному току усилителя рис.1.8,а

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

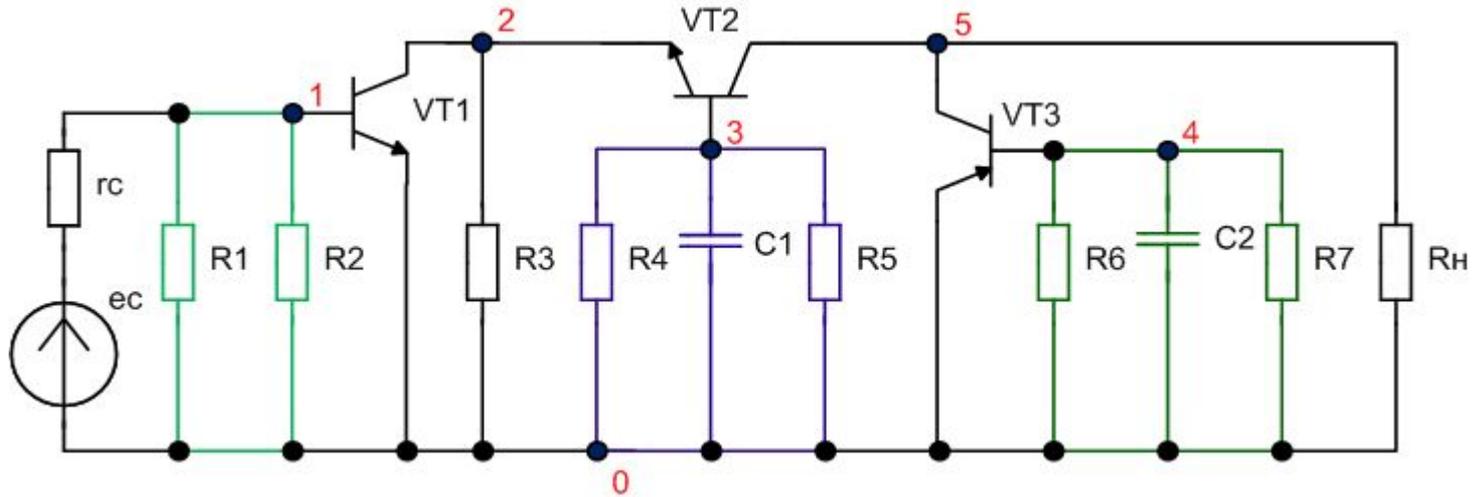


Рис.1.8,в – Вариант 2 схемы замещения по переменному току усилителя рис.1.8,а

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

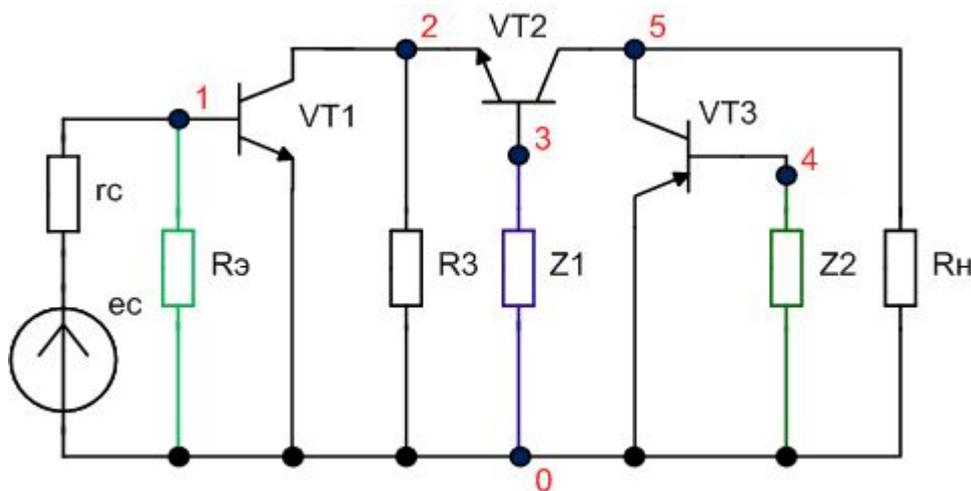


Рис.1.8,в – Вариант 3 схемы замещения по переменному току усилителя рис.1.8,а

$$R_y = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2};$$

$$Z_1 = \frac{\frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} \times \frac{1}{pC_1}}{\frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} + \frac{1}{pC_1}};$$

$$Z_2 = \frac{\frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} \times \frac{1}{pC_2}}{\frac{R_6 \cdot R_7}{R_6 + R_7} + \frac{1}{pC_2}};$$

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

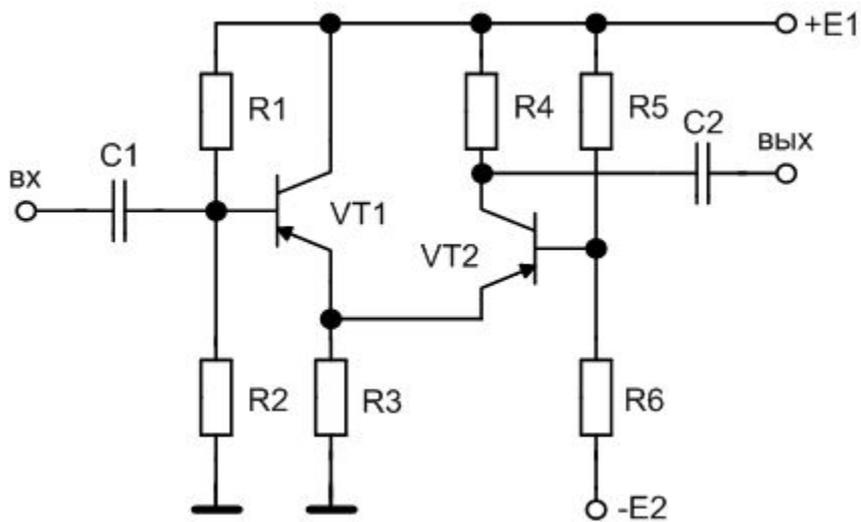


Рис.1.9,а – Схема усилителя

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

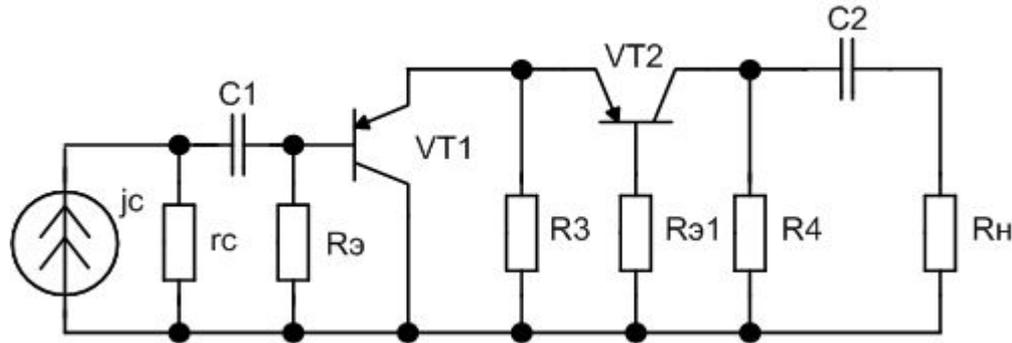


Рис.1.9,б – Схема замещения по переменному току усилителя рис.1.9,а

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

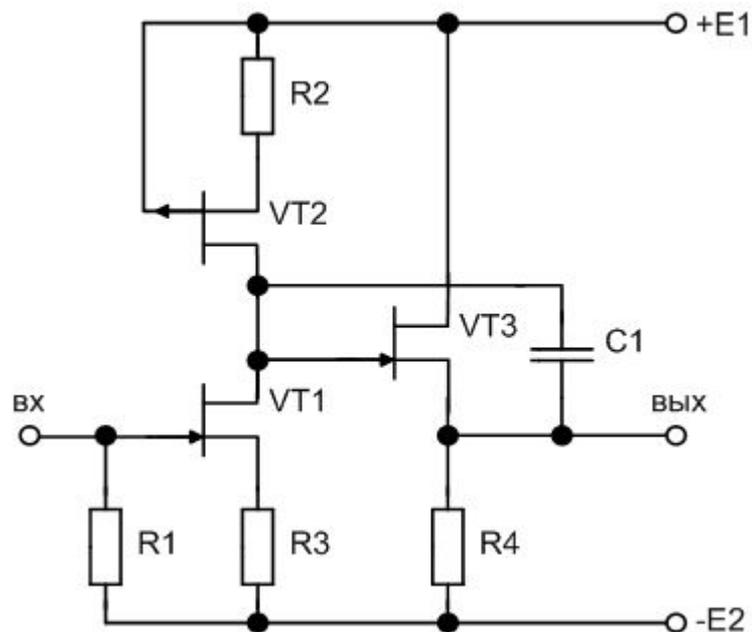


Рис.1.10,а – Схема усилителя

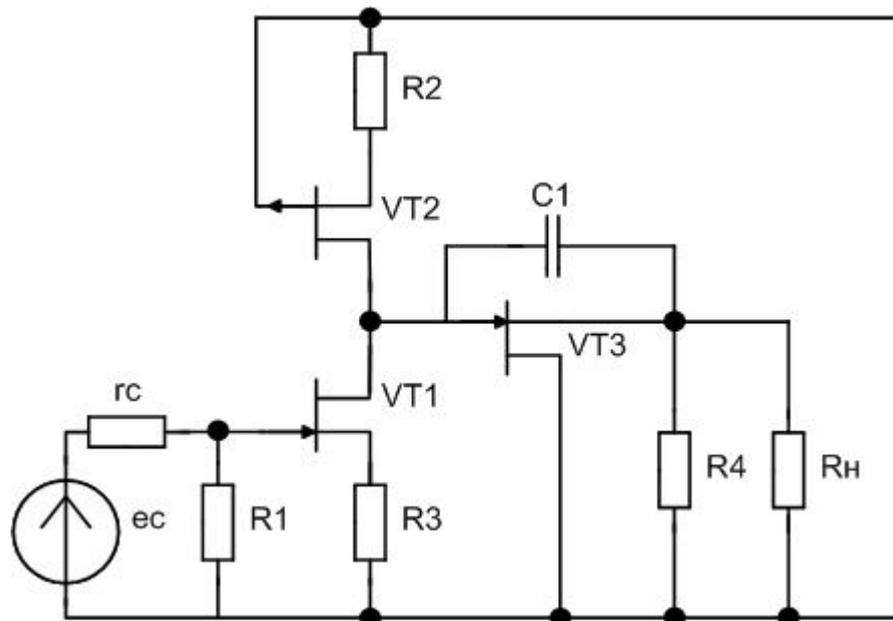


Рис.1.10,б – Вариант 1 схемы замещения по переменному току усилителя рис.1.10,а

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

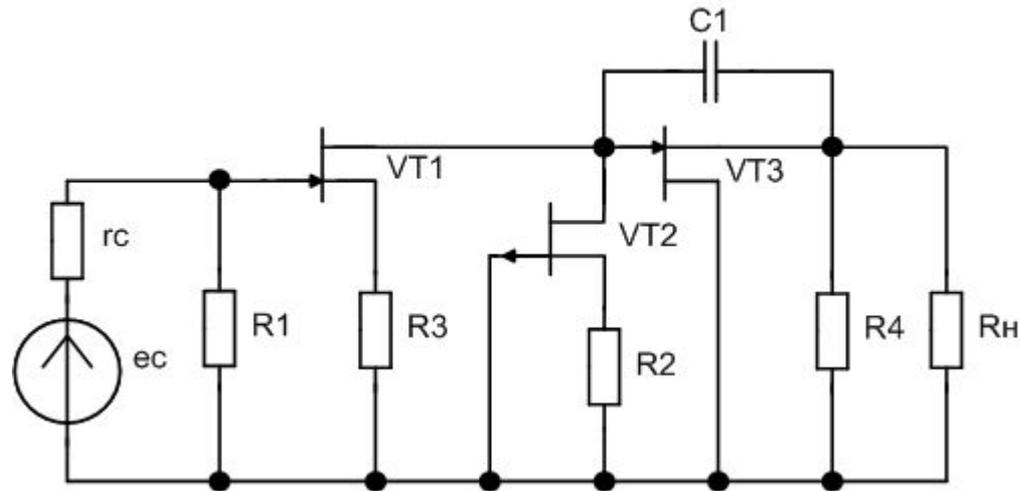


Рис.1.10,в – Вариант 2 схемы замещения по переменному току усилителя рис.1.10,а

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Вопрос 4. Для схемы рис.В.4 укажите количество узлов.

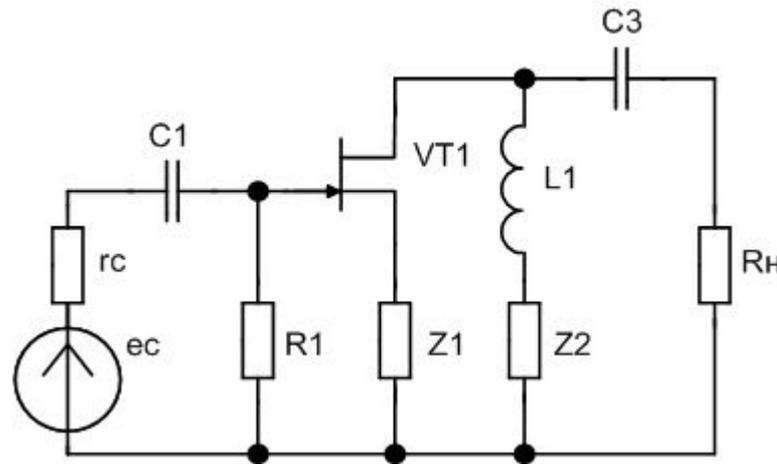


Рис.В.4 – Схема замещения электронной схемы по переменному току

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Вопрос 4. Для схемы рис.В.4 укажите количество узлов.

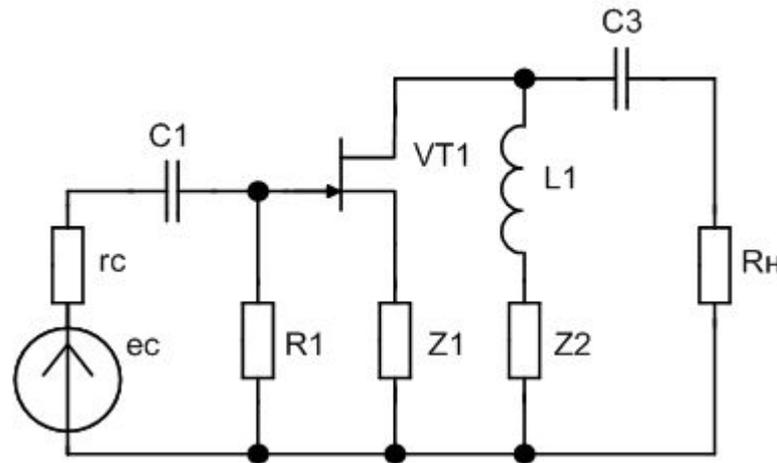


Рис.В.4 – Схема замещения электронной схемы по переменному току

Правильный ответ : **7** узлов.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Вопрос 5. Для схемы рис.В.5 укажите количество узлов.

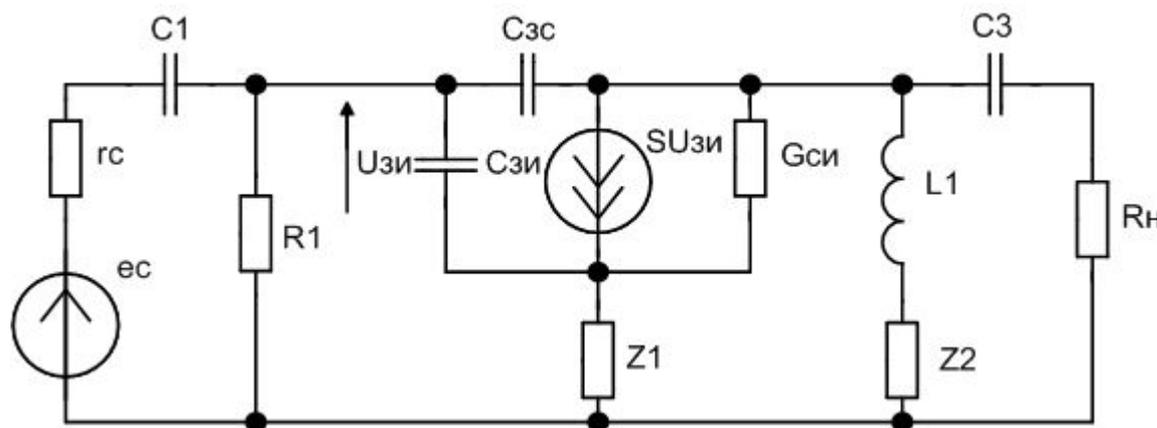


Рис.В.5 – Схема замещения электронной схемы по переменному току

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Вопрос 5. Для схемы рис.В.5 укажите количество узлов.

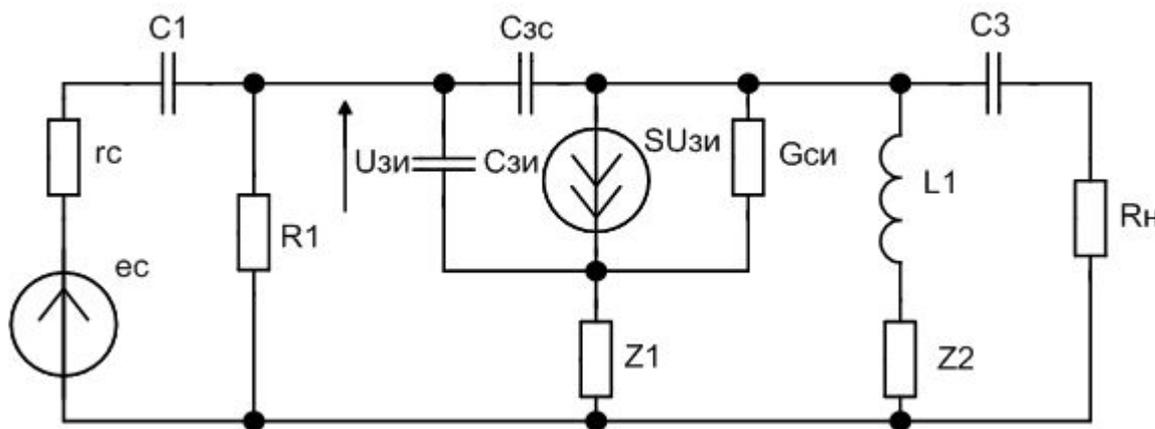


Рис.В.5 – Схема замещения электронной схемы по переменному току

Правильный ответ: **7** узлов.

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Вопрос 6. Как будут включены резисторы R5 и R6 (параллельно, последовательно) в схеме замещения по переменному, составленной для схемы рис. В.6.

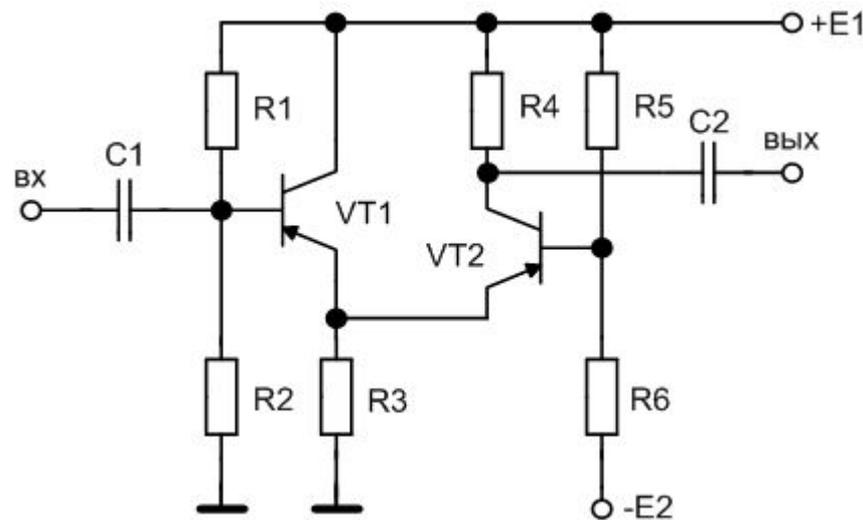


Рис. В.6 – Электронная схема

Схемы замещения электронной цепи по переменному току

Вопрос 6. Как будут включены резисторы R5 и R6 (параллельно, последовательно) в схеме замещения по переменному, составленной для схемы рис. В.6.

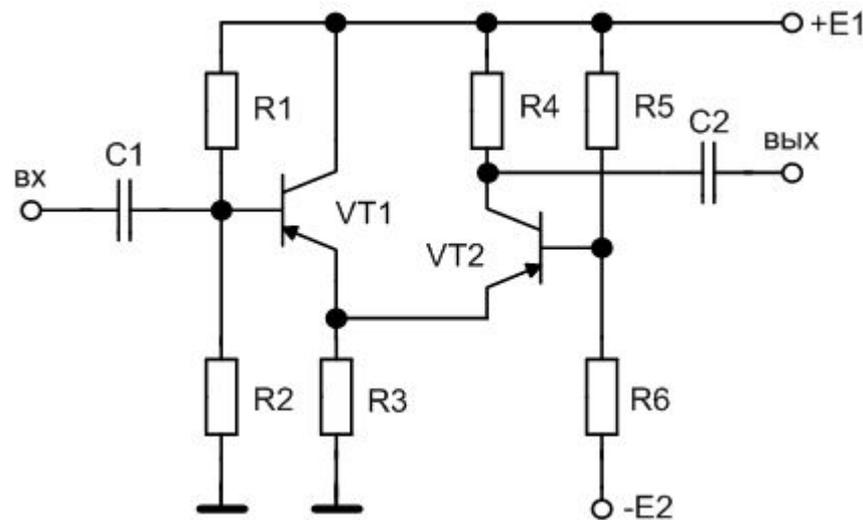


Рис. В.6 – Электронная схема

Правильный ответ: **параллельно**

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные формы представления топологических моделей.
2. Укажите способ исключения из исходной электронной схемы источника постоянного напряжения при составлении топологической модели по переменному току.
3. Укажите способ исключения из исходной электронной схемы источника постоянного тока при составлении топологической модели по переменному току.

Рекомендуемая литература

- 1. Легостаев Н.С.** Методы анализа и расчета электронных схем: учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Эль Контент, 2013. – 158 с. ISBN 978-5-4332-0076-0
- 2. Легостаев Н.С.** Методы анализа и расчета электронных схем: руководство к организации самостоятельной работы / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники , 2006. – 215 с.
- 3. Легостаев Н.С.** Методы анализа и расчета электронных схем: учебное пособие / Н.С. Легостаев, К.В. Четвергов. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2006. – 110 с. ISBN 5-86889-304-2

Спасибо за внимание

Вопросы и пожелания можно присылать через диспетчерский отдел ФДО.

Следующее занятие будет посвящено **полюсным графам**, **топологическим матрицам** и **топологическим уравнениям**.

Для подготовки к занятию изучите материал, представленный в разделе 2.2 учебного пособия на страницах 21-33.

Постарайтесь уяснить основные понятия – **дерево**, **сечение**, **главное сечение**, **главный контур**.