

Министерство образования Украины  
Киевский политехнический институт

## **Теория электронных схем**

Методические указания для практических занятий  
для студентов факультета электронной техники

### **Часть I**

## **РЕЗИСТИВНЫЕ СХЕМЫ**

Утверждено на заседании  
кафедры физической и  
биомедицинской  
электроники  
Протокол № 7  
от 8 февраля 1995

Киев КПИ 1995

Теория электронных схем. Методические указания для практических занятий для студентов факультета электронной техники. Часть I "Резистивные схемы" / Сост.: О.А. Витязь., В.П. Сигорский, В.И. Тимофеев. - К.: КПИ, 1995. - 68 с.

Составители: Витязь Олег Алексеевич  
Сигорский Виталий Петрович  
Тимофеев Владимир Иванович

Ответственный редактор В.В. Минаков

Рецензент В.Г. Артюхов

Редактор М.В. Прокопенко

Підп. до друку . Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub> . Папір друк №3.  
Друк офсетний. Ум. др. арк. . Ум. фарбо-відб. . Облік.-вид. арк. .  
Тираж 600. Зам. № . Безплатно.  
КПІ, 252056, Київ-56, пр. Перемоги, 37  
Фірма "Віпол"  
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

Методические указания предназначены для приобретения навыков практического применения теории, излагаемой в разделе "Резистивные схемы" курса "Теория электронных схем". Студенту предлагается предварительно изучить теоретические положения данного раздела, а затем самостоятельно приступить к выполнению упражнений и решению задач.

Методические указания сгруппированы по восьми темам в соответствии с тематическим делением теоретической части данного раздела курса. Коротко описывается назначение используемых методов, их область применения. Обращается внимание на особенности применения формул и алгоритмов, возможные трудности, возникающие при решении задач. Рассматриваются пути сокращения времени на вычисления.

В соответствии с программой курса каждому студенту выдается расчетно-графическая работа, предназначенная для закрепления навыков использования методов анализа электронных и электрических схем. Приведено содержание расчетно-графической работы и описаны варианты индивидуальных заданий.

Ускорить решение задач и избавиться от рутинных вычислений позволяет использование соответствующих прикладных программ для персональных компьютеров. Не стоит пренебрегать и программируемыми микрокалькуляторами, функциональные возможности которых достаточны для решения многих задач.

Необходимый справочный материал сгруппирован в таблицы, приведенные в заключительной части. Ссылки на него даются в ходе пояснений с указанием номера таблицы и страницы, на которой она расположена. Дополнительную информацию можно почерпнуть из рекомендуемой литературы, список которой приводится в конце методических указаний.

## **1. ЦЕПИ, СХЕМЫ, СИГНАЛЫ**

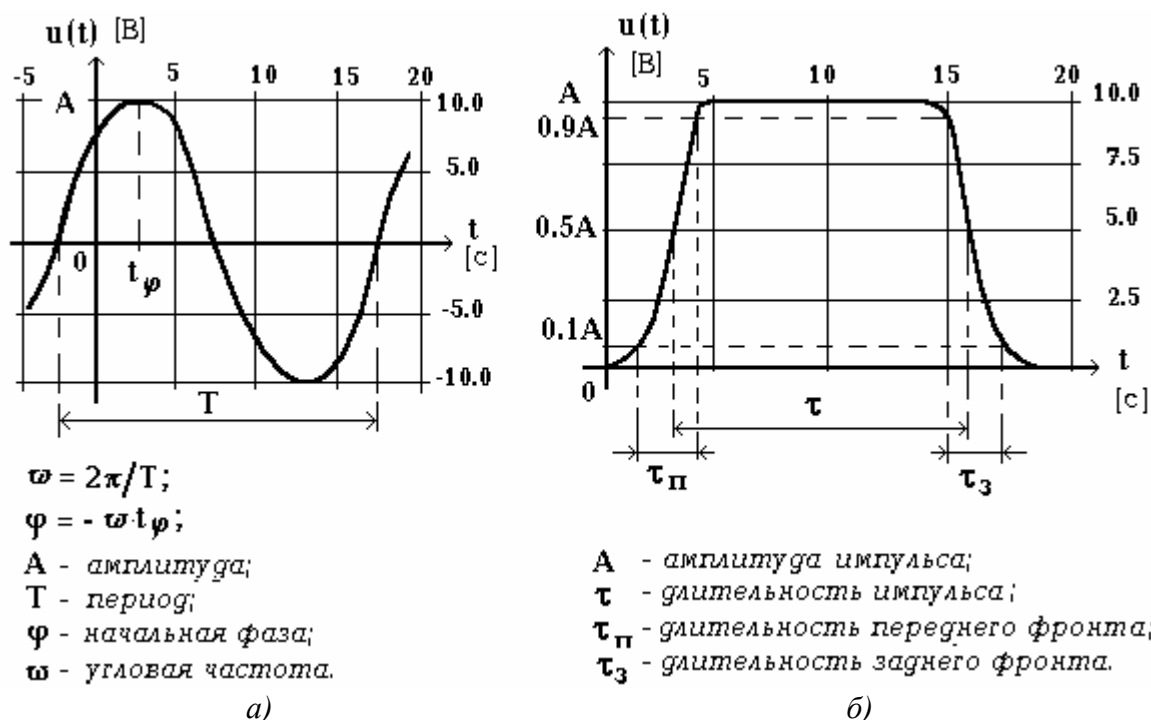
Для определения характеристик электронных цепей расчетным путем необходимо знать:  
основные электрофизические величины и связывающие их соотношения;  
характеристики компонентов, входящих в цепь;  
структуру цепи, т.е. схему соединения компонентов между собой;  
методы формирования и анализа моделей цепи.

Характеристики электронной цепи позволяют судить о том, как цепь влияет на электрические сигналы, поступающие в нее от независимых источников.

Под сигналами, как правило, понимают токи или напряжения, источниками которых служат специальные электронные устройства (источники тока или источники напряжения). Расчет токов и напряжений на компонентах цепи имеет своей целью получить информацию о

свойствах (характеристиках) цепи. С этой же целью рассчитывают такие электрофизические величины как заряд, потокосцепление самоиндукции, мощность, энергию и т.п.

К наиболее важным тестовым сигналам, воздействие которых используется для определения характеристик электронной техники, относятся гармонический сигнал и прямоугольный импульсный сигнал, параметры которых необходимо знать и уметь определять (рис. 1.1).

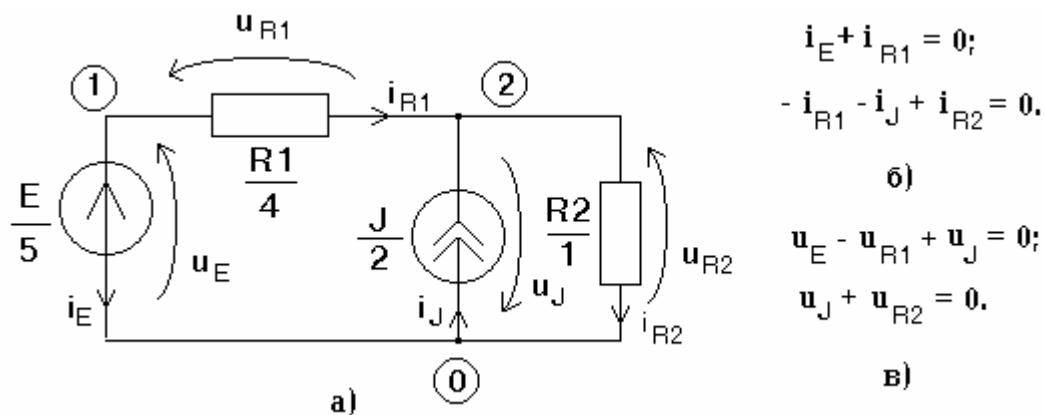


**Рис. 1.1.** Сигналы: а) гармонический; б) импульсный.

При изучении раздела "Резистивные схемы" рассматриваются только схемы с сосредоточенными параметрами. Цепь можно представить схемой с сосредоточенными параметрами при выполнении определенных соотношений между геометрическими размерами цепи, по которой проходит сигнал, и параметрами сигнала, воздействующего на цепь.

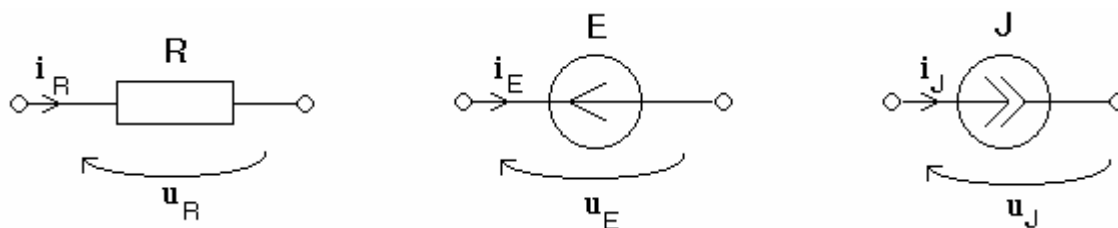
Так при воздействии на цепь *гармонического сигнала* должно выполняться соотношение  $d \ll \Lambda$ , где **d** - наибольшая длина пути, по которому сигнал проходит в цепи,  **$\Lambda$**  - длина волны сигнала ( $\Lambda = cT$ , **c** - скорость света, **T** - период сигнала). В этом случае цепь можно представить схемой с сосредоточенными параметрами.

Для расчета токов и напряжений в схемах с сосредоточенными параметрами допускается использование первого и второго законов Кирхгофа. Топологические уравнения (уравнения Кирхгофа) удобно формировать по схемной модели цепи или просто схеме (рис. 1.2), а также по структурному графу схемы (т.е. топологической модели).



**Рис. 1.2.** а) схема с обозначенными токами и напряжениями;  
 б) топологические уравнения для узлов схемы (I закон Кирхгофа);  
 в) топологические уравнения для контуров схемы (II закон Кирхгофа).

Токи  $i$  и напряжения  $u$  на компонентах схемы обозначаются стрелками. Если ток и напряжение относятся к одному и тому же двухполюснику, то соответствующие им стрелки должны быть направлены встречно. Такое направление тока и напряжения на двухполюснике называется согласованным (рис. 1.3).

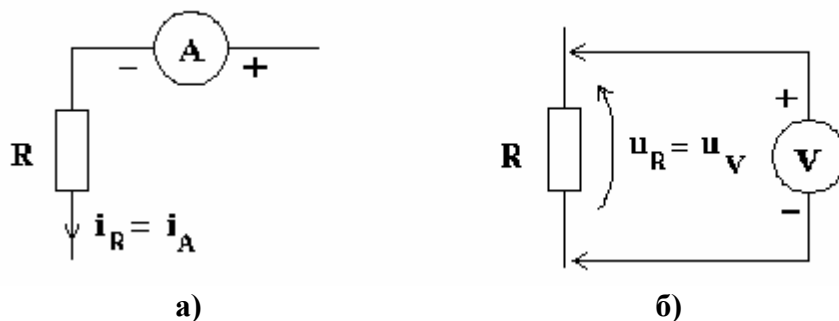


**Рис. 1.3.** Согласованные направления тока  $i$  и напряжения  $u$  на сопротивлении  $R$ , идеальном источнике напряжения  $E$  и идеальном источнике тока  $J$ .

Выбранное направление стрелки для тока  $i_R$  (рис. 1.4а) указывает на полярность подключения амперметра в цепь при измерении тока. Клеммы амперметра должны подключаться так, чтобы направление от плюсовой клеммы к минусовой клемме амперметра совпадало с направлением стрелки, обозначающей ток  $i_R$ . В этом случае показание амперметра равно току  $i_R$ , обозначенному на схеме стрелкой.

Выбранное направление стрелки для напряжения  $u_R$  (рис. 1.4б) указывает на полярность подключения вольтметра при измерении напряжения. Плюсовая клемма вольтметра должна подключаться к тому узлу, к которому направлено острие стрелки, а минусовая клемма вольтметра - к противоположному узлу. В этом случае показание вольтметра равно напряжению  $u_R$ , обозначенному на схеме стрелкой.

Физическое направление постоянного тока или напряжения в реальной цепи, может не



**Рис. 1.4.** Соответствие между а) обозначением тока  $i_R$  и полярностью подключения амперметра  $A$ ; б) обозначением напряжения  $u_R$  и полярностью подключения вольтметра  $V$ .

соответствовать направлению, указанному стрелкой на схеме. В этом случае в стрелочном измерительном приборе стрелка отклонялась бы влево при измерении, т.е. измеренное значение

тока или напряжения было бы отрицательным. Это означает, что ток  $i$  или напряжение  $u$  имеют отрицательные значения.

Стрелка, обозначающая изменяющееся во времени напряжение, указывает на полярность подключения осциллографа. Аналогичный смысл имеет и направление стрелки, обозначающей изменяющийся ток.

Топологические уравнения в совокупности с компонентными уравнениями образуют полную систему уравнений, решив которую можно определить все токи и напряжения в схеме.

## Задачи и упражнения

1.1. На рис.1.5 изображены эпюры переменного тока  $i(t)$  и напряжения  $u(t)$  на некотором двухполюснике. Построить эпюры мгновенной мощности  $p(t)$  и энергии  $w(t)$ . Определить среднее значение мощности, развиваемое на двухполюснике в активном и пассивном состояниях.

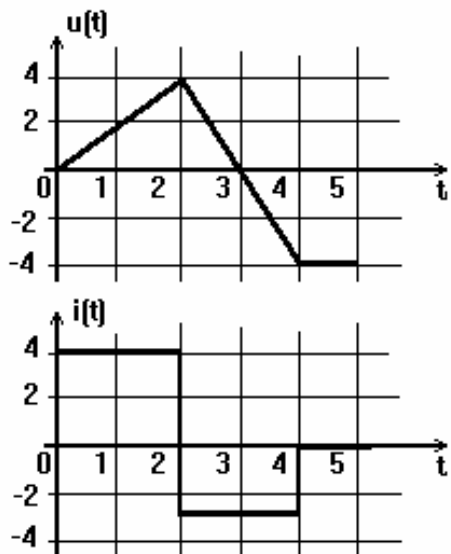


Рис. 1.5

1.2. Изобразить структурный граф схемы рис.1.6 и записать независимые топологические уравнения.

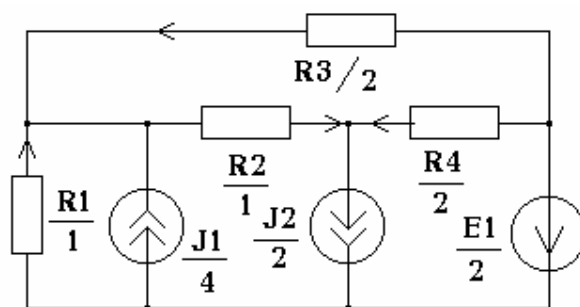


Рис. 1.6

1.3. Расчитать в схеме рис.1.6 все токи и напряжения и определить, какие из двухполюсников активны, а какие пассивны; о чем говорят отрицательные значения токов на сопротивлениях?

сопротивлениях?

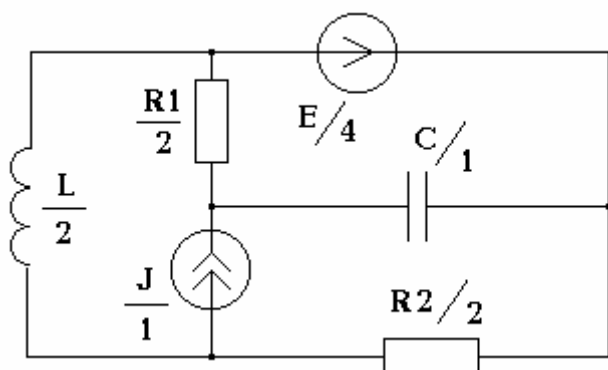


Рис. 1.7

1.4. Записать полную систему уравнений схемы рис. 1.7 и определить, к какому типу уравнений она принадлежит?

1.5. Определить значения параметров гармонического и прямоугольного импульсного сигналов, изображенных на рис. 1.1. Представить в аналитической форме гармонический сигнал.

1.6. Определить предельные линейные размеры пути, по которому

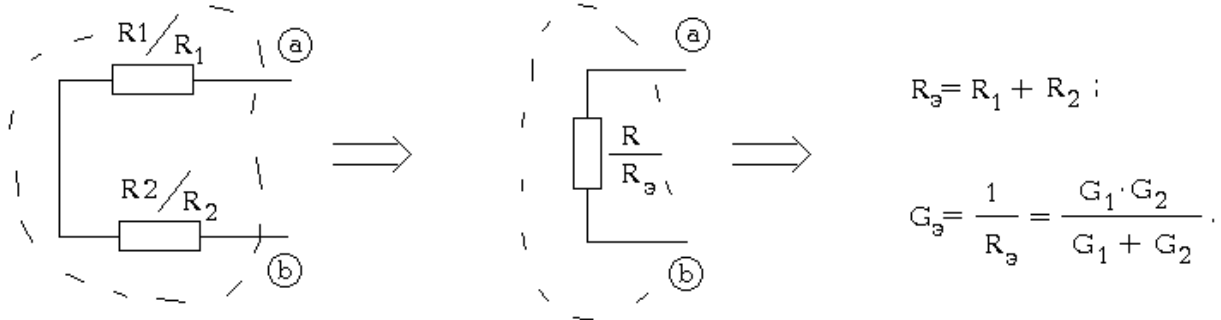
можно передавать гармонический сигнал рис. 1.1, чтобы в цепи выполнялись законы Кирхгофа.

## 2. ЛИНЕЙНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ СХЕМЫ

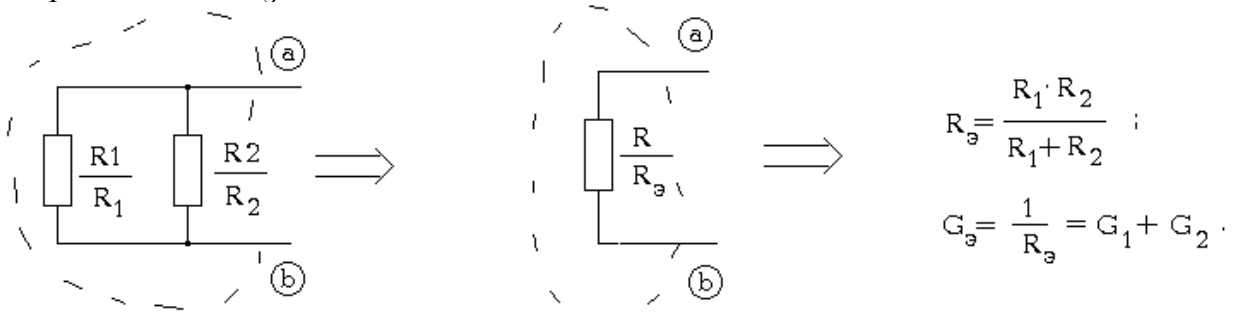
Для анализа линейных резистивных схем необходимо знать способы эквивалентных преобразований подсхем, состоящих из двух и более компонентов. К линейным относятся схемы, составленные из линейных компонентов, т.е. компонентов, полюсные токи и напряжения которых связаны между собой линейными соотношениями. Например: зависимость между током  $i$  и напряжением  $u$  на линейном сопротивлении  $R$  (проводимости  $G$ ) характеризуется линейным соотношением (закон Ома):  $u= Ri$  или  $i=Gu$  ( $G=1/R$ ).

Расчет токов и напряжений на компонентах линейных резистивных схем можно произвести методом эквивалентных преобразования подсхем. Для этого необходимо знать следующие эквивалентные преобразования:

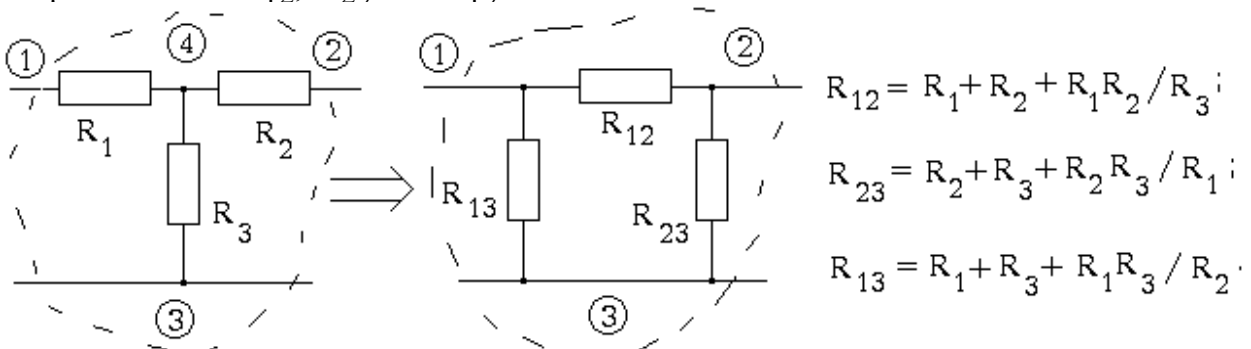
1) двухполюсную подсхему, состоящую из последовательно соединенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , можно заменить одним эквивалентным сопротивлением  $R_3$ :



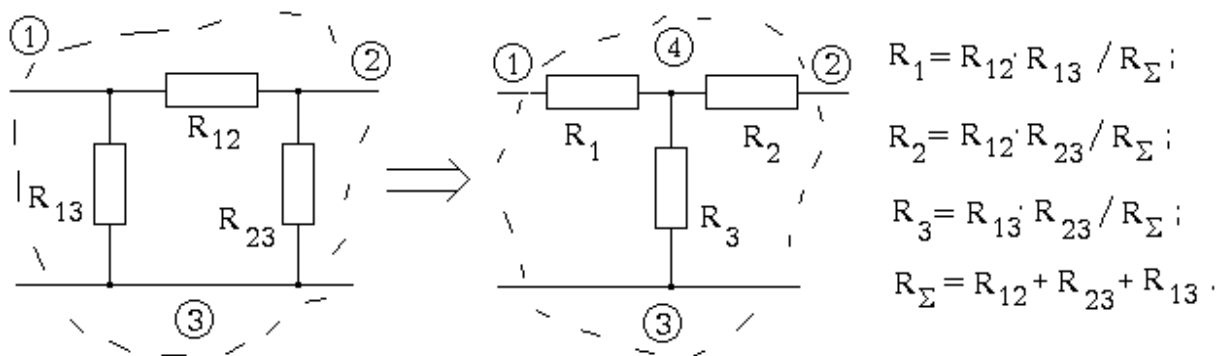
2) двухполюсную подсхему, состоящую из параллельно соединенных сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , можно заменить одним эквивалентным сопротивлением  $R_3$ :



3) трехполюсную подсхему "звезда", состоящую из сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , можно заменить эквивалентной трехполюсной подсхемой "треугольник", состоящей из сопротивлений  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  и  $R_{13}$ :

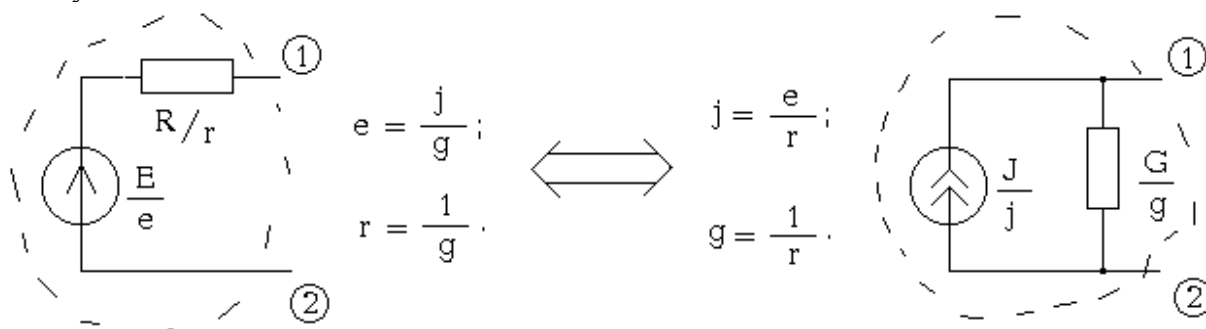


4) трехполюсную подсхему "треугольник", состоящую из сопротивлений  $R_{12}$ ,  $R_{23}$  и  $R_{13}$ , можно заменить эквивалентной трехполюсной подсхемой "звезда", состоящей из сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ :

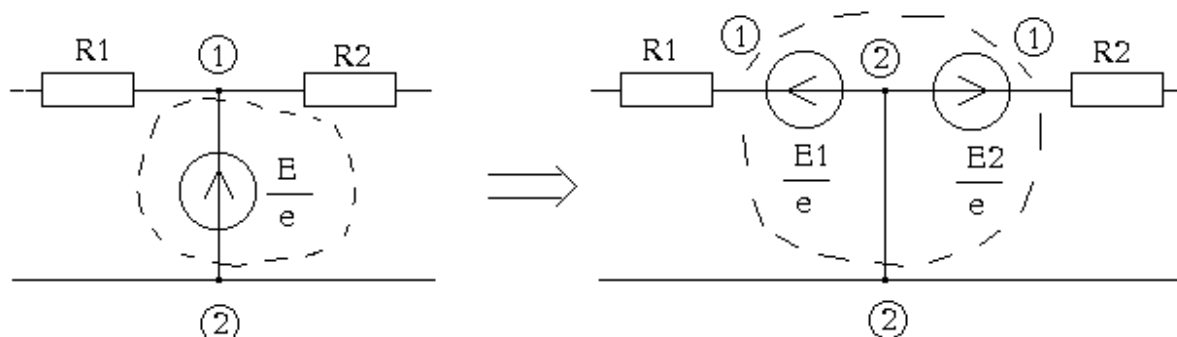


5)

двухполюсную подсхему, состоящую из последовательно соединенных источника напряжения  $E$  и сопротивления  $R$  (реальный источник напряжения), можно заменить двухполюсной подсхемой, состоящей из параллельно соединенных источника тока  $J$  и проводимости  $G$  (реальным источником тока); аналогично выполняют и противоположную замену:

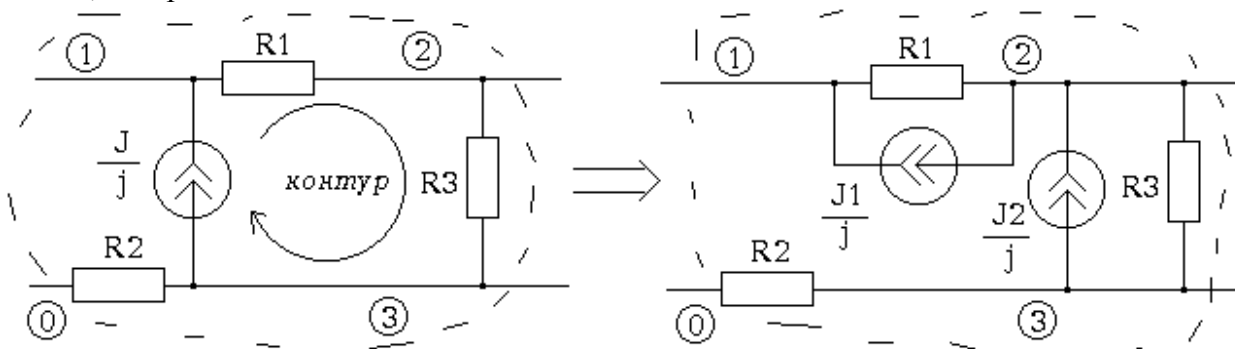


6) идеальный источник напряжения  $E$  преобразуется в реальный, если его вынести за один из узлов схемы, к которым подключены его полюсы:



7)

идеальный источник тока  $J$  преобразуется в реальный, если его внести в контур исходной схемы, содержащий идеальный источник  $J$ :





Эквивалентные преобразования подسхем позволяют любую линейную резистивную схему упростить до делителя напряжения (рис. 2.1) или до делителя тока (рис. 2.2) и рассчитать токи и

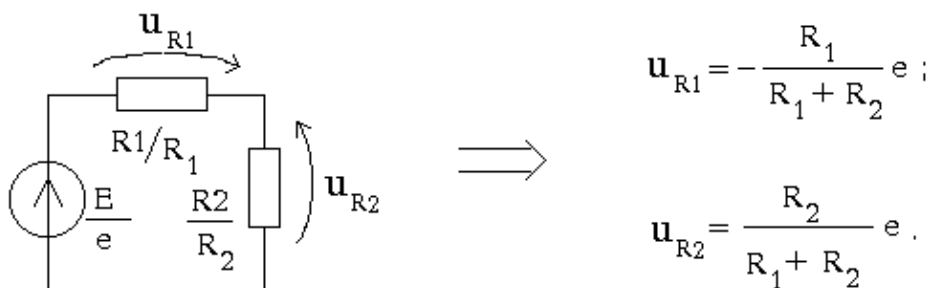


Рис. 2.1. Делитель напряжения.

напряжения по приведенным на рисунках формулам.

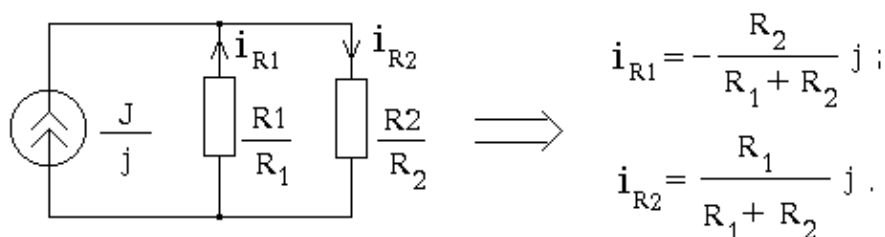


Рис. 2.2. Делитель тока.

Расчет токов и напряжений в исходной схеме проводят с использованием промежуточных эквивалентных схем, взятых в порядке, обратном их появлению при переходе от исходной схемы к соответствующему делителю.

Если линейная резистивная схема содержит несколько задающих источников, то для упрощения эквивалентных преобразований при переходе к делителю используют принцип суперпозиции (наложения). При подавлении источников необходимо помнить, что внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю, а идеального источника тока - бесконечности.

## Задачи и упражнения

2.1. Для схемы рис. 2.3 определить, относительно какой пары полюсов эквивалентное

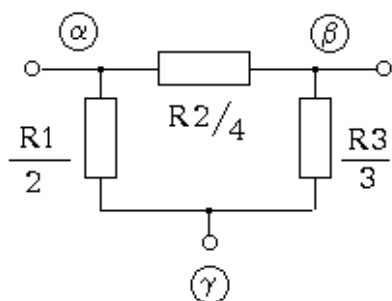


Рис. 2.3

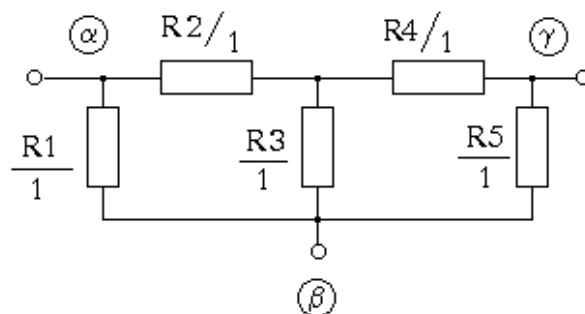


Рис. 2.4

сопротивление минимально и чему равно его значение.

2.2. Расчитать эквивалентные сопротивления  $R_{\alpha\beta}$ ,  $R_{\alpha\gamma}$  и  $R_{\beta\gamma}$  в схемах рис. 2.4; 2.8.

2.3. Определить сопротивление между узлами  $\alpha$  и  $\beta$  схемы рис. 2.5, если количество соединенных пар сопротивлений равно пяти. Получить рекуррентную формулу для определения сопротивления между узлами  $\alpha$  и  $\beta$  при соединении  $n$  пар сопротивлений.

2.4. На рис. 2.6 сопротивление вольтметра  $R_V = 1 \text{ МОм}$ , а сопротивление амперметра  $R_A = 10 \text{ Ом}$ . Определить значение сопротивления  $R_X$ , если показание вольтметра равно 8 В, а показание амперметра равно 1 мА. Какое значение имеет напряжение  $e$  независимого источника?

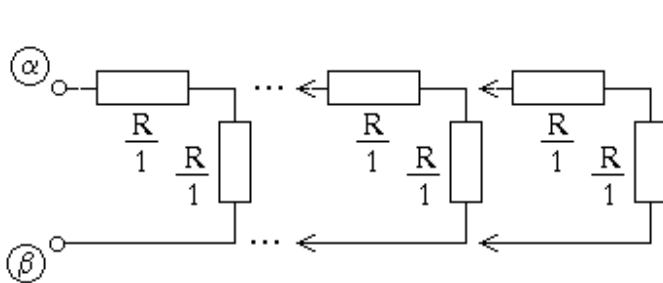


Рис. 2.5

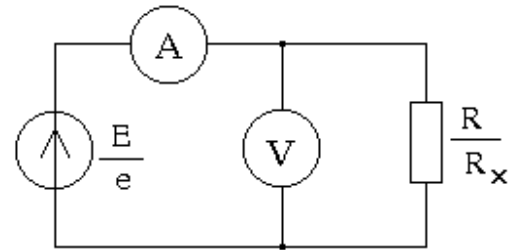


Рис. 2.6

2.5. Воспользовавшись исходными данными задачи 2.4, определить те же искомые величины в схеме рис. 2.7.

2.6. В схеме рис. 2.6 положить  $e = 10 \text{ В}$ ,  $R_A = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_X = 1 \text{ кОм}$  и построить зависимость  $U_V = f(R_V)$ . Определить и изобразить графически зависимость  $R_X = f(R_V)$ , если величину  $R_X$  определять как  $U_V / i_A$ .

2.7. В схеме рис. 2.7 принять  $e = 20 \text{ В}$ ,  $R_A = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_V = 100 \text{ кОм}$ ; определить и изобразить графически зависимость  $R_{X,\text{расчетное}} = f(R_{X,\text{истинное}})$ , если  $R_{X,\text{расчетное}}$  определять по следующей формуле:  $R_{X,\text{расчетное}} = U_V / i_A$ .

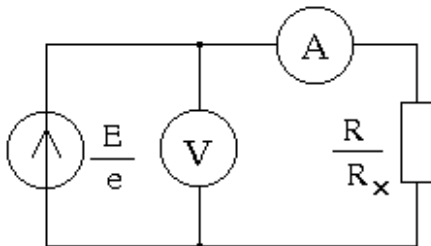


Рис. 2.7

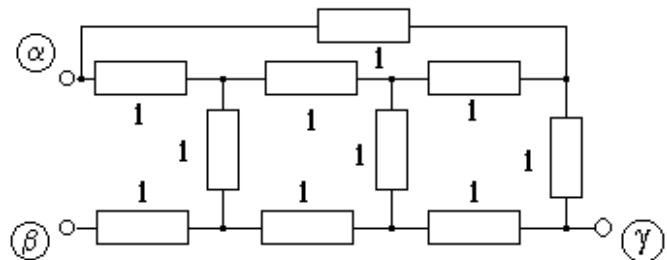


Рис. 2.8

2.8. Рассчитать все токи и напряжения в схеме рис. 2.9. При каком значении напряжения  $e$  мощность, отдаваемая в схему источником напряжения, составит половину мощности, потребляемой всей схемой при исходном значении  $e$ ?

2.9. Определить значение тока  $i_{R4}$  в схеме рис. 2.9 методом эквивалентного источника и сравнить со значением  $i_{R4}$ , полученным по принципу суперпозиции.

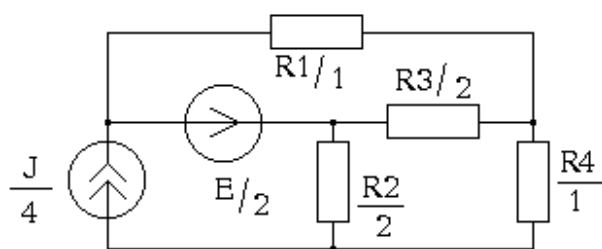


Рис. 2.9

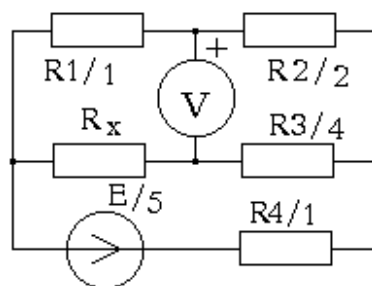


Рис. 2.10

2.10. Идеальный вольтметр в схеме рис. 2.10 показывает нулевое значение напряжения. Определить значение сопротивления  $R_x$ .

2.11. В схеме рис. 2.10 принять  $R_x = 1,2 \text{ Ом}$ . Определить внутреннее сопротивление вольтметра  $R_V$ , если он показывает напряжение  $0,33 \text{ В}$ .

2.12. К активному двухполюснику рис. 2.11 поочередно подключают амперметр с внутренним сопротивлением  $R_A = 5 \text{ Ом}$  и вольтметр с внутренним сопротивлением  $R_V = 100 \text{ кОм}$ . Определить параметры эквивалентного источника активного двухполюсника, если показания приборов равны соответственно  $1 \text{ А}$  и  $10 \text{ В}$ . Чему равно внутреннее сопротивление другого амперметра, если при его подключении к активному двухполюснику измеренный ток составил  $1,2 \text{ А}$ ?

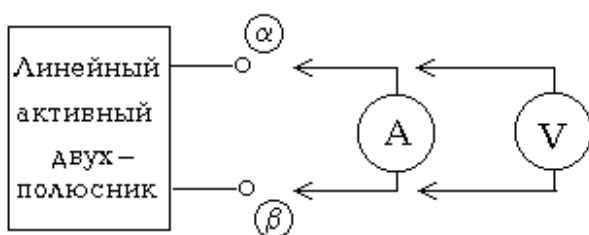


Рис. 2.11

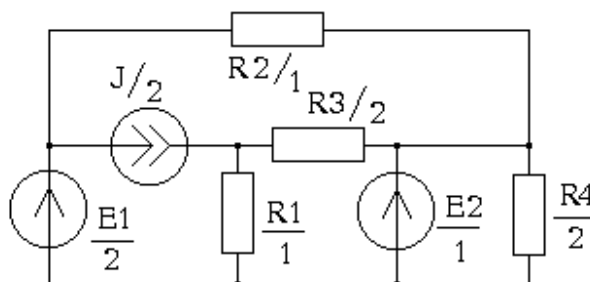


Рис. 2.12

2.13. В схеме рис. 2.12 определить значение напряжения источника  $E_2$ , при котором мощность, выделяемая на источнике тока  $J$ , равнялась бы нулю.

2.14. Подключить к узлам  $\alpha$  и  $\beta$  схемы рис. 2.4 источник тока  $j = 10 \text{ А}$  и определить значение сопротивления  $R_5$ , при котором ток  $i_{R_5}$  был бы равен  $1 \text{ А}$ .

2.15. Имеется линейный резистивный двухполюсник. Как экспериментальным путем определить параметры его эквивалентного источника, не прибегая к измерению тока короткого замыкания?

### 3. УЗЛОВОЙ МЕТОД

Для применения узлового метода необходимо знать, как формируется узловая модель схемы и как выполняется ее анализ. Узловая модель линейной резистивной схемы представляет собой систему линейных алгебраических уравнений

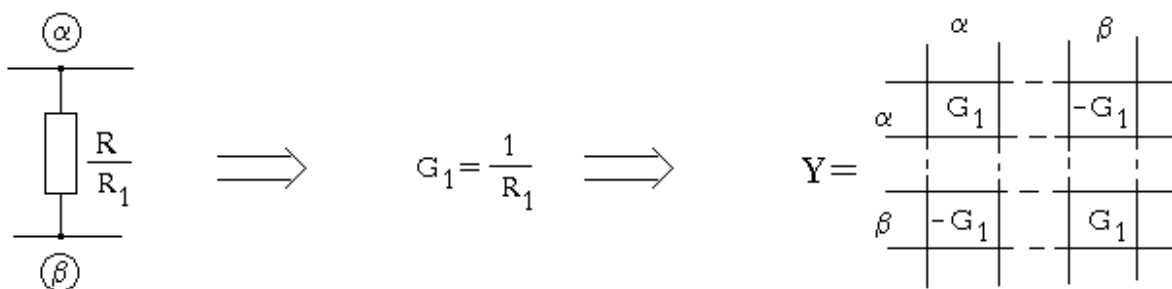
$$\mathbf{YV} = \mathbf{J},$$

где  $\mathbf{Y}$ -матрица проводимости;  $\mathbf{V}$ -вектор узловых напряжений;  $\mathbf{J}$ -задающий вектор.

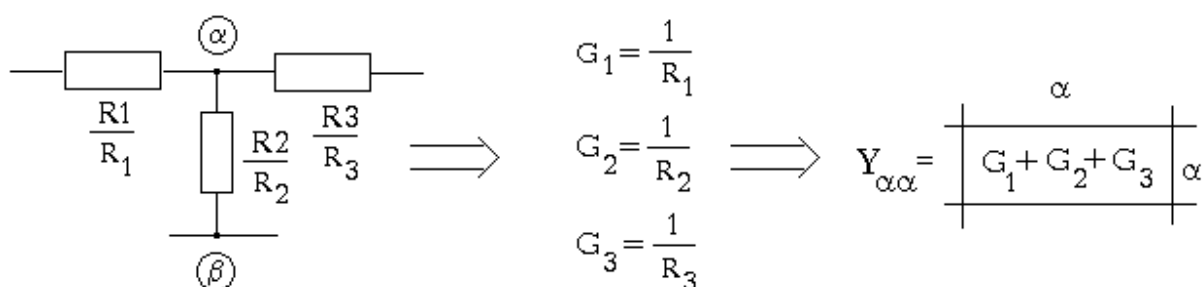
Узловой метод позволяет рассчитывать узловые напряжения, полюсные токи и напряжения на компонентах схемы, определять параметры эквивалентного источника и т.д.

**Прямой метод формирования узловой модели.** Прямой метод формирования заключается в заполнении клеток матрично-векторных параметров узловой модели ( $\mathbf{Y}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{J}$ ) непосредственно по схеме, используя известные правила.

Например, проводимость  $G_1$ , включенная между узлами  $\alpha$  и  $\beta$ , вносится в матрицу проводимости  $\mathbf{Y}$  следующим образом:

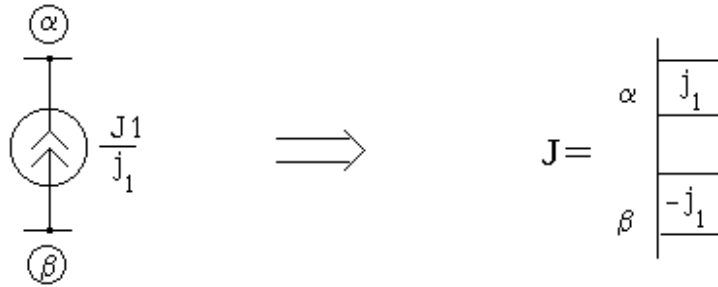


Тогда после внесения всех проводимостей схемы в матрицу проводимости  $\mathbf{Y}$  узловой модели любой диагональный элемент матрицы будет равен сумме проводимостей, инцидентных соответствующему узлу схемы, т.е. собственной проводимости узла. Например:

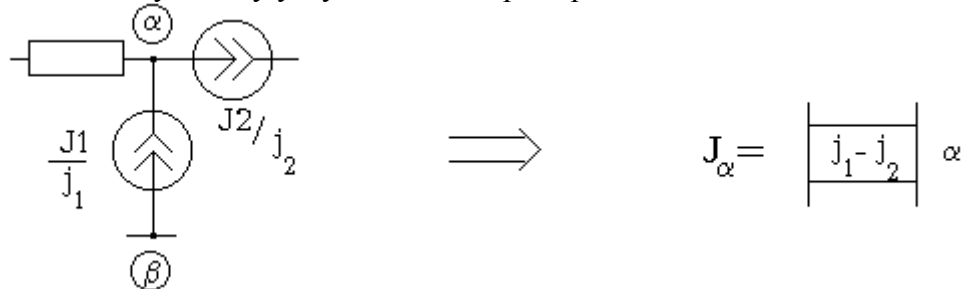


Вне главной диагонали матрицы  $\mathbf{Y}$  будут расположены взаимные проводимости соответствующих узлов.

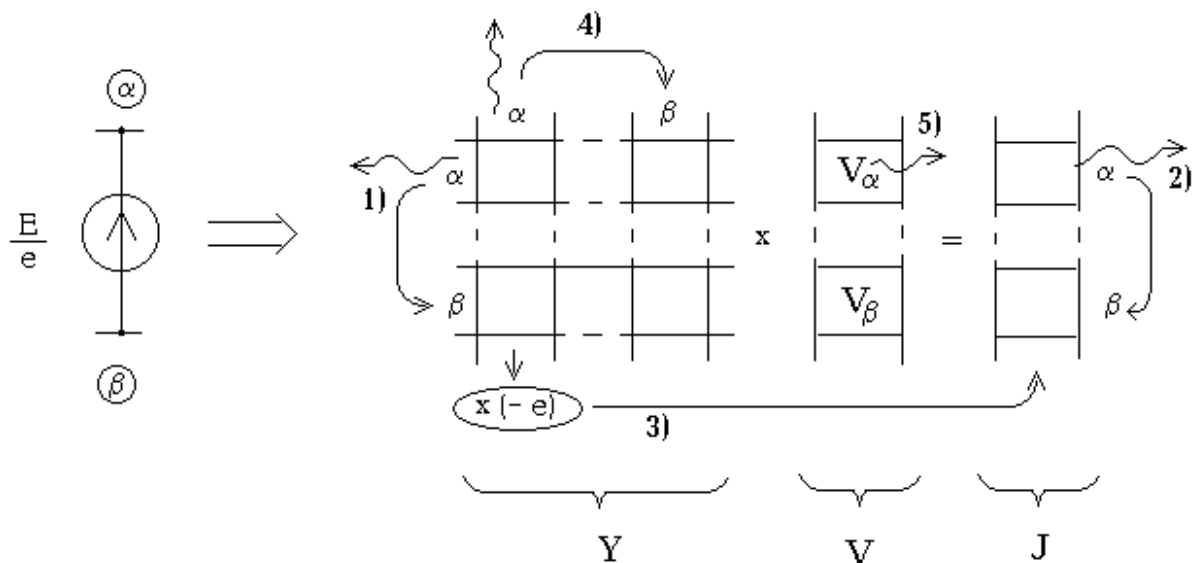
Ток идеального источника тока  $\mathbf{J1}$ , включенного между узлами  $\alpha$  и  $\beta$  схемы, вносится с учетом направления в соответствующие клетки задающего вектора  $\mathbf{J}$  следующим образом:



Тогда после внесения всех токов идеальных источников в задающий вектор  $\mathbf{J}$  каждый элемент вектора будет равен алгебраической сумме токов идеальных источников тока, инцидентных соответствующему узлу схемы. Например:



Идеальный источник напряжения, включенный между узлами  $\alpha$  и  $\beta$  схемы учитывается в узловой модели по следующему алгоритму:



- 1) Строка  $\alpha$  матрицы  $\mathbf{Y}$  прибавляется к строке  $\beta$  и вычеркивается.
- 2) Элемент  $\alpha$  вектора  $\mathbf{J}$  прибавляется к элементу  $\beta$  и вычеркивается.
- 3) Столбец  $\alpha$  матрицы  $\mathbf{Y}$  прибавляется к столбцу  $\beta$ .
- 4) Столбец  $\alpha$  матрицы  $\mathbf{Y}$  умножается поэлементно на напряжение источника  $\mathbf{e}$  (знак  $x$  на рисунке), если источник направлен от узла  $\alpha$ , или на  $(-\mathbf{e})$  в противоположном случае, а затем поэлементно прибавляется к вектору  $\mathbf{J}$  и вычеркивается.
- 5) Элемент  $\alpha$  вектора узловых напряжений  $\mathbf{V}$  вычеркивается.

Таким образом, каждый источник напряжения уменьшает исходный порядок матрицы проводимости  $\mathbf{Y}$  на единицу вследствие вычеркивания строки и столбца. На единицу уменьшается и размерность векторов  $\mathbf{V}$  и  $\mathbf{J}$ .

Если в схеме имеется несколько идеальных источников напряжения, то данный алгоритм применяется к каждому из них. Имя строки, полученной в результате суммирования строк,

образуется объединением имен сложенных строк. Так, например, суммирование строк  $\alpha$  и  $\beta$  матрицы  $\mathbf{Y}$  приводит к образованию одной строки  $\alpha, \beta$ .

Неизвестные узловые напряжения в сформированной системе узловых уравнений можно определить, например, по формуле Крамера:

$$V_k = \frac{\Delta_k}{\Delta} = \frac{1}{\Delta} \sum_{s=1}^n \Delta_{sk} J_s ;$$

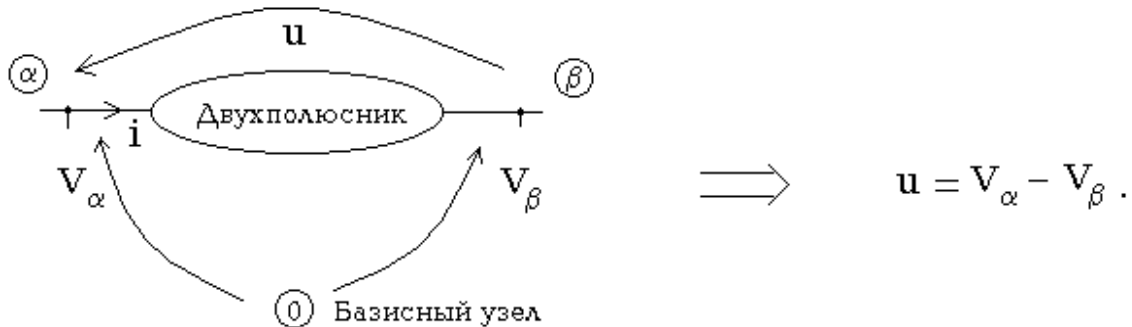
где  $\Delta$  - определитель матрицы проводимости  $\mathbf{Y}$ ,  $\Delta_k$  - определитель матрицы  $\mathbf{Y}$ , в которой столбец  $k$  предварительно заменен задающим вектором  $\mathbf{J}$ ,  $J_s$  - элементы вектора  $\mathbf{J}$ ,  $n$  - порядок матрицы  $\mathbf{Y}$ .

Алгоритм Гаусса - Жордана состоит в выполнении эквивалентных преобразований системы узловых уравнений, записанных в виде матрицы:

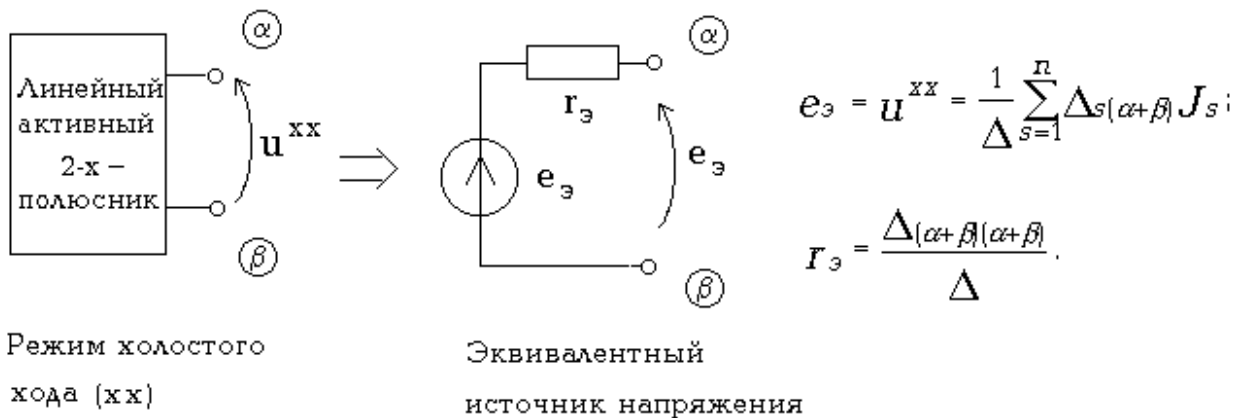
$$[\mathbf{Y}, \mathbf{J}] \Rightarrow [\mathbf{E}, \mathbf{V}].$$

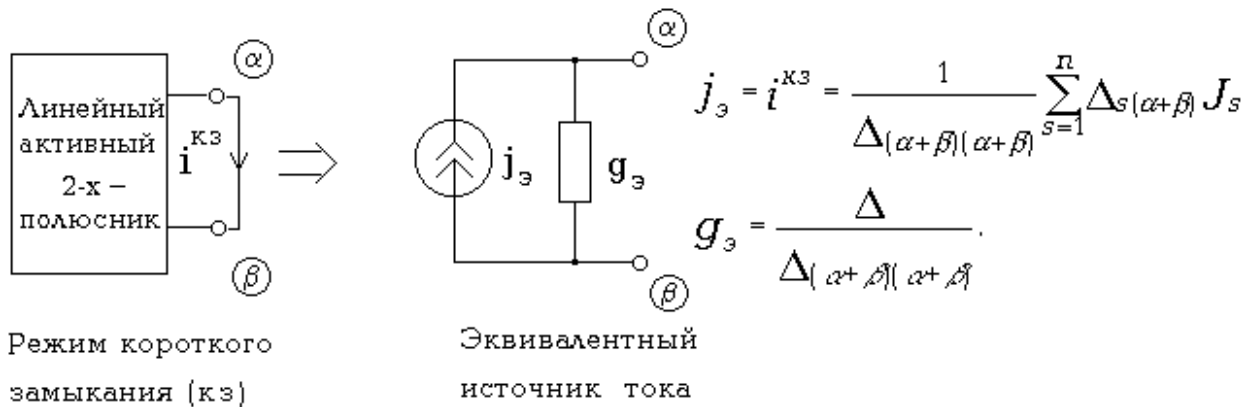
Т.е. в результате выполнения эквивалентных преобразований на месте матрицы проводимости  $\mathbf{Y}$  должна появиться единичная матрица  $\mathbf{E}$ , тогда задающий вектор  $\mathbf{J}$  преобразуется в вектор узловых напряжений  $\mathbf{V}$ .

Найденные узловые напряжения можно использовать для определения полюсного напряжения любого компонента исходной схемы:



Схемные параметры эквивалентного источника напряжения  $e_{\varepsilon}$  и  $r_{\varepsilon}$  или эквивалентного источника тока  $j_{\varepsilon}$  и  $g_{\varepsilon}$  можно рассчитать через матрично-векторные параметры узловой модели  $\mathbf{Y}$  и  $\mathbf{J}$  соответствующего двухполюсника:





**Матричный метод формирования узловой модели** основан на использовании структурной матрицы схемы  $A=[A_G, A_J]$ , компонентной матрицы  $G$  и вектора токов идеальных источников тока  $j$ :

$$Y = A_G G A_G^T; \quad J = -A_J j.$$

Его можно использовать для формирования узловой модели RJ-схем.

### Задачи и упражнения

3.1. Сформировать узловую модель схемы рис. 3.1 матричным методом и прямым методом записи матрично-векторных параметров. Сравнить полученные результаты.

3.2. Рассчитать все токи и напряжения в схеме рис.3.2 узловым методом: а) сведя схему к регулярному виду; б) используя алгоритм учета источника напряжения в узловой модели.

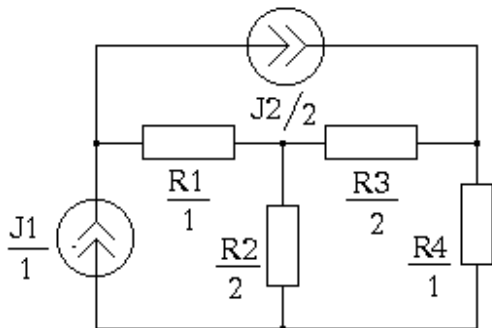


Рис. 3.1

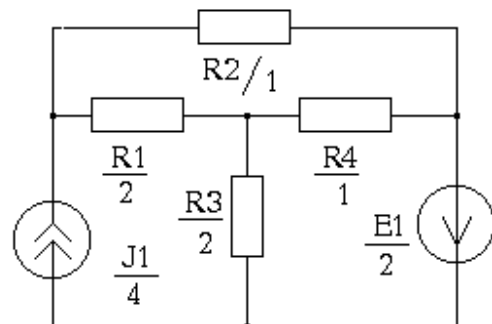


Рис. 3.2

3.3. Рассчитать значение тока  $i_{R1}$ , представив схему рис. 3.3 эквивалентным источником напряжения.

3.4. Определить в схеме рис. 3.4 значения мощностей, выделяемых источниками тока и напряжения. Какие из источников находятся в режиме потребления энергии?

3.5. Убедиться в справедливости теоремы Телегена, рассчитав мощности на компонентах схемы, изображенной на рис. 3.5.

3.6. Определить величину сопротивления, которое необходимо подключить параллельно сопротивлению  $R5$ , чтобы выделяемая на этом сопротивлении мощность была максимальной. Чему она равна?

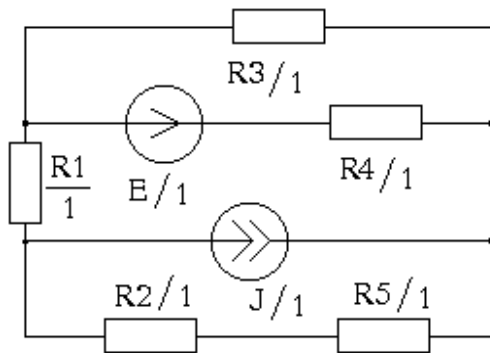


Рис. 3.3

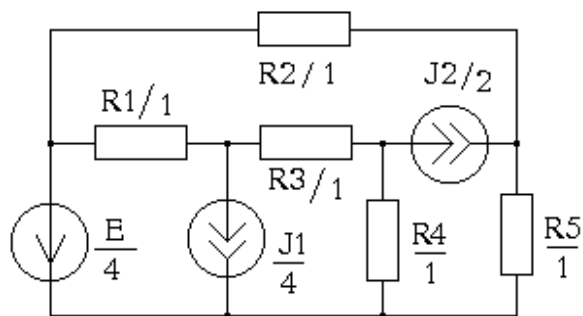


Рис. 3.4

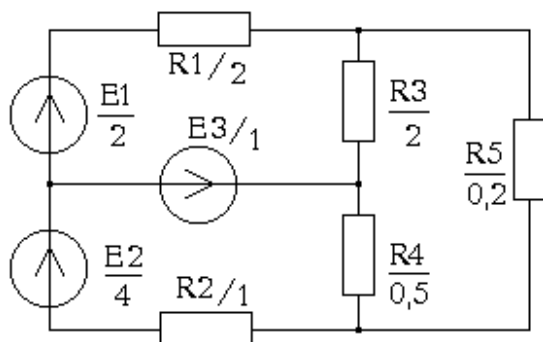


Рис. 3.5

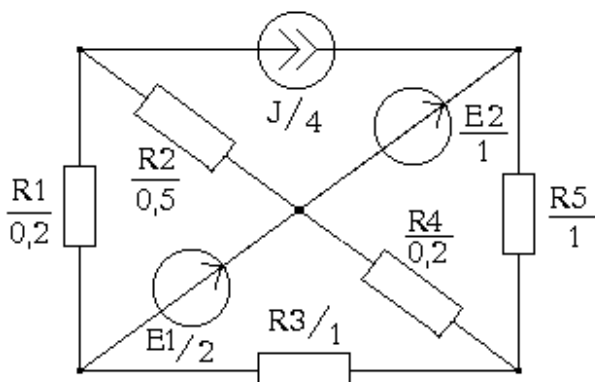


Рис. 3.6

3.7. В схеме рис. 3.7 определить значение напряжения  $u$ . При решении задачи использовать узловую модель выше третьего порядка или выполнять предварительные эквивалентные преобразования не допускается.

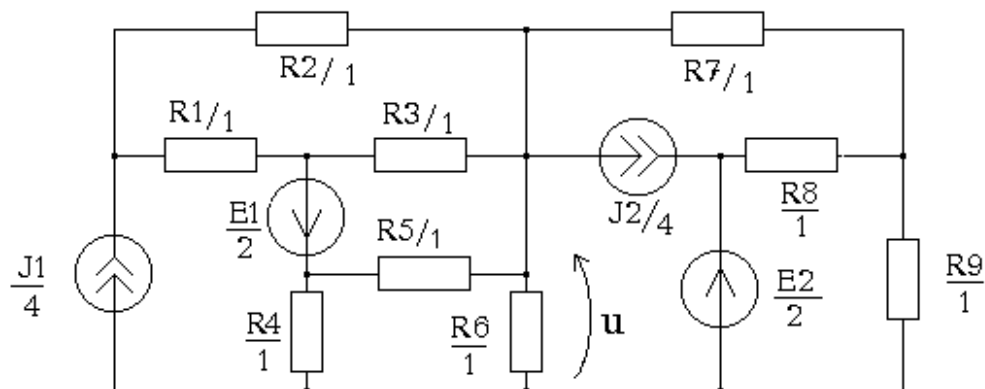


Рис. 3.7

3.8. Определить в схеме рис. 3.5 значение сопротивления  $R3$ , при котором выделяемая на нем мощность будет максимальной.

3.9. Определить в схеме рис. 3.6 значение напряжения источника  $E2$ , при котором ток через сопротивление  $R5$  будет равен 1 А.



#### 4. СИСТЕМЫ С ДВУМЯ СТОРОНАМИ

При решении некоторых задач целесообразно схему представлять как систему с двумя сторонами (четыреполюсник). Например, если необходимо исследовать зависимость тока, напряжения или мощности на некотором сопротивлении от величины этого сопротивления  $R_H$  и от величины сигнала источника, то такую схему удобно рассматривать как систему с двумя сторонами (рис. 4.1).

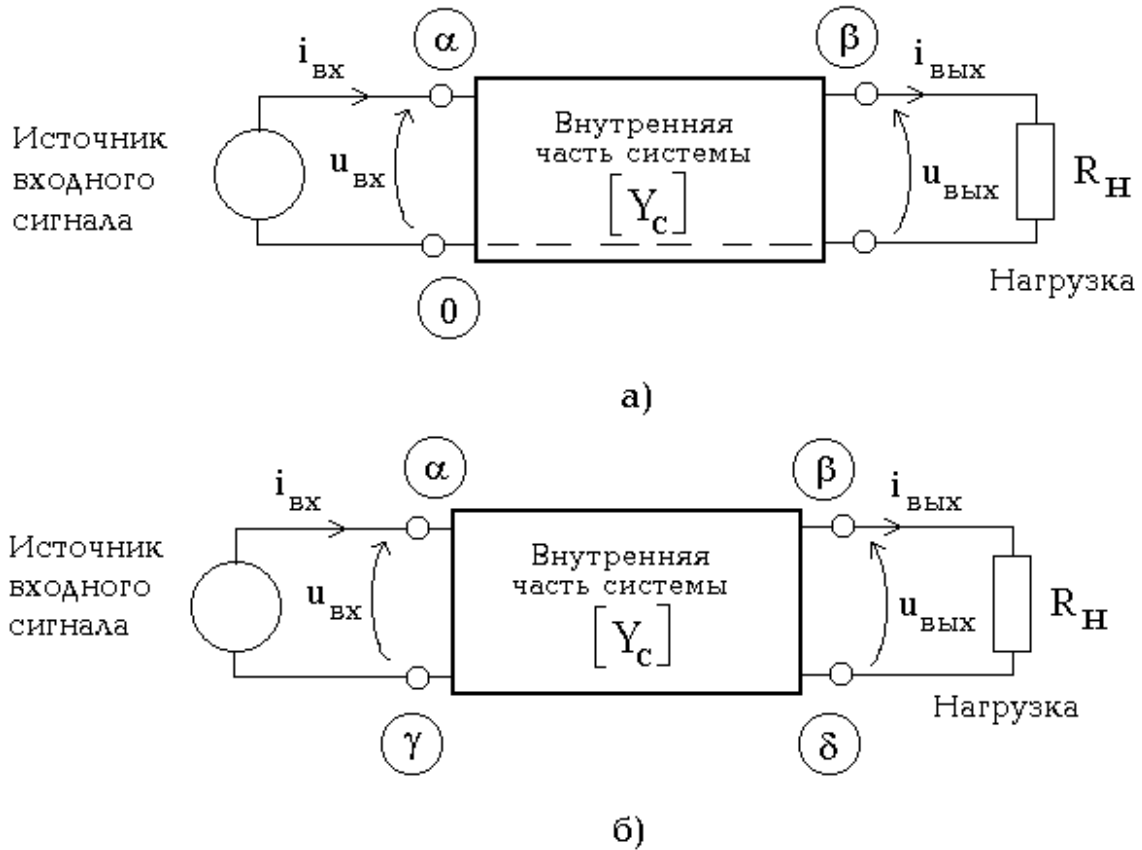


Рис. 4.1. Системы с двумя сторонами: а) уравновешенный четырехполюсник; б) проходной четырехполюсник.

Входной сигнал (воздействие  $u_{ВХ}$  или  $i_{ВХ}$ ) поступает от независимого источника соответственно напряжения или тока. Напряжение или ток в нагрузке (реакция  $u_{ВЫХ}$  или  $i_{ВЫХ}$ ) зависит как от величины воздействия, так и от сопротивления нагрузки  $R_H$ , а также от свойств внутренней части системы.

Любая линейная система с двумя сторонами характеризуется четырьмя параметрами. Параметры представляют собой коэффициенты в уравнениях системы, связывающих внешние токи и напряжения, т.е.  $i_{ВХ}$ ,  $i_{ВЫХ}$ ,  $u_{ВХ}$  и  $u_{ВЫХ}$ . Например, уравнения системы в h-параметрах имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u_{вх} &= h_{11} \cdot i_{вх} + h_{12} \cdot u_{вых}; \\ i_{вых} &= h_{21} \cdot i_{вх} + h_{22} \cdot u_{вых}. \end{aligned}$$

Уравнения системы можно решить относительно неизвестных токов и напряжений совместно с уравнением нагрузки  $u_{ВЫХ} = R_H i_{ВЫХ}$  или  $i_{ВЫХ} = G_H u_{ВЫХ}$ . Одна из входных величин при этом считается известной как сигнал независимого источника.

Кроме h-параметров системы можно указать еще пять групп параметров. Параметры одной группы можно выразить через параметры любой другой группы путем эквивалентных

преобразований известных уравнений системы (табл. 10.2, с. 51). Количество групп параметров (шесть) определяется количеством комбинаций из четырех внешних величин по две.

Параметры системы можно рассчитать, зная матрицу проводимости внутренней части системы  $Y_c$  (табл. 10.3, с. 52). Параметры реальной системы можно определить и путем измерений. Например, параметры  $h_{11}$  и  $h_{21}$  можно определить, выполнив измерения в соответствии с рис.4.2.



$$h_{11} = \frac{u_{ex}}{i_{ex}} = \frac{u_V}{j}, \quad h_{21} = \frac{i_{вых}}{i_{ex}} = \frac{i_A}{j}, \quad (u_{вых} = 0).$$

Рис. 4.2. Экспериментальное определение параметров системы.

Схемные функции ( $K_u$ ,  $K_i$  и т.д.) позволяют легко находить реакцию системы при изменении входного сигнала. Их можно рассчитать через матрицу проводимости внутренней части системы  $Y_c$  (табл. 10.4, с. 53) или через параметры системы (табл. 10.5, с. 54). Матрица проводимости внутренней части системы  $Y_c$  формируется по принципиальной схеме без учета независимых источников и сопротивления нагрузки.

Для правильного выбора формулы (табл. 10.4, с. 53) необходимо определить, является ли рассматриваемая система с двумя сторонами уравновешенным или проходным четырехполюсником. В случае проходного четырехполюсника требуется выполнить замену индексов.

Если сопротивление нагрузки  $R_H$  бесконечно велико (проводимость нагрузки  $G_H$  равна нулю), то на выходе системы имеет место режим холостого хода. Если сопротивление нагрузки  $R_H$  равно нулю (бесконечно велика проводимость  $G_H$ ), то на выходе имеет место режим короткого замыкания. В этих случаях формулы для расчета схемных функций упрощаются (табл. 10.4, с. 53).

Если в схеме содержится несколько независимых источников и требуется найти одну реакцию, то ее можно представить как систему с многими входами и одним выходом. Количество входов равно количеству независимых источников. Реакция в этом случае определяется по принципу суперпозиции.

Например, выходной ток системы с тремя входами (рис. 4.3) можно определить через схемные функции следующим образом:

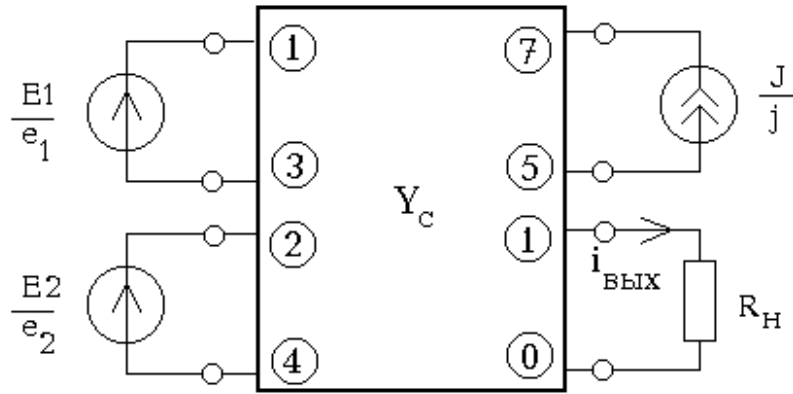


Рис. 4.3. Система с тремя входами и одним выходом.

$$\begin{aligned}
 i_{\text{вых}} &= i_{\text{вых}1} \Big|_{\substack{e_2=0 \\ j=0}} + i_{\text{вых}2} \Big|_{\substack{e_1=0 \\ j=0}} + i_{\text{вых}3} \Big|_{\substack{e_1=0 \\ e_2=0}} = \\
 &= Y_{\text{пер}}^{1)} \cdot e_1 + Y_{\text{пер}}^{2)} \cdot e_2 + K_i \cdot j = \\
 &= \frac{\Delta(1+3)1,(2+4)(2+4)}{R' \cdot \Delta(1+3)(1+3),(2+4)(2+4) + \Delta(1+3)(1+3),11,(2+4)(2+4)} \cdot e_1 + \\
 &+ \frac{\Delta(2+4)1,(1+3)(1+3)}{R' \cdot \Delta(1+3)(1+3),(2+4)(2+4) + \Delta(1+3)(1+3),11,(2+4)(2+4)} \cdot e_2 + \\
 &+ \frac{\Delta(7+5)1,(1+3)(1+3),(2+4)(2+4)}{R' \cdot \Delta(1+3)(1+3),(2+4)(2+4) + \Delta(1+3)(1+3),11,(2+4)(2+4)} \cdot j .
 \end{aligned}$$

При подавлении идеального источника напряжения  $E_2$  ( $e_2=0$ ) производится соединение узлов 2 и 4 схемы короткозамкнутой дугой, т.е. происходит объединение этих узлов в один узел. Поэтому в исходную формулу для вычисления  $Y_{\text{пер}}^{1)}$  (см. табл. 10.4, с. 53) внесены изменения, учитывающие объединение узлов, а именно: к каждому алгебраическому дополнению и к определителю дописаны суммирующиеся индексы  $(2+4)(2+4)$ .

В общем случае при подавлении идеального источника напряжения, включенного между узлами  $\alpha$  и  $\beta$  схемы, в соответствующей исходной формуле для расчета схемной функции необходимо дописать пары суммирующихся индексов  $(\alpha+\beta)(\alpha+\beta)$ . Пары суммирующихся индексов дописываются ко всем алгебраическим дополнениям и к определителю, которые содержатся в исходной формуле.

Если подавляемых источников напряжения несколько, то дописывается и несколько пар суммирующихся индексов, соответствующих узлам включения подавляемых источников.

Подавление идеального источника тока не влияет на формулу для вычисления схемной функции, так как на месте подавленного источника тока остается разрыв, т.е. узлы включения идеального источника тока не объединяются.

**Кратное алгебраическое дополнение**  $\Delta_{i_1 j_1, i_2 j_2, \dots, i_k j_k}$  кратности  $k$  вычисляется в четыре этапа следующим образом (кратность  $k$  определяется количеством пар индексов  $i_1 j_1, \dots, i_k j_k$ , разделенных запятыми):

- 1) вычеркиваются из матрицы строки с именами  $i_1, i_2, \dots, i_k$ ;
- 2) вычеркиваются из матрицы, получившейся после вычеркивания строк, столбцы с именами  $j_1, j_2, \dots, j_k$ ;
- 3) вычисляется определитель матрицы, получившейся после вычеркивания строк и столбцов;
- 4) полученное значение определителя домножается на  $(-1)^M$ , где показатель  $M$  вычисляется по следующей формуле:

$$M = (i_1 + i_2 + \dots + i_k) + \varepsilon_1 + (j_1 + j_2 + \dots + j_k) + \varepsilon_2, \text{ где}$$

$i_1, i_2, \dots, i_k$  - порядковые номера вычеркнутых строк с именами  $i_1, i_2, \dots, i_k$ ;

$j_1, j_2, \dots, j_k$  - порядковые номера вычеркнутых столбцов с именами  $j_1, j_2, \dots, j_k$ ;

$\varepsilon_1$  - количество беспорядков в последовательности номеров вычеркнутых строк  $(i_1, i_2, \dots, i_k)$ ;

$\varepsilon_2$  - количество беспорядков в последовательности номеров вычеркнутых столбцов  $(j_1, j_2, \dots, j_k)$ .

Количество беспорядков в последовательности номеров равно количеству перестановок, которые необходимо выполнить, чтобы упорядочить эту последовательность номеров. Упорядочивая последовательности номеров строк и столбцов, необходимо обе последовательности привести или к порядку возрастания, или к порядку убывания.

**Свойства кратных алгебраических дополнений:**

- 1) допускается взаимная перестановка имен строк или имен столбцов, причем каждая такая перестановка приводит к изменению знака перед кратным алгебраическим дополнением:

$$\Delta_{25,34} = -\Delta_{35,24} = \Delta_{34,25};$$

- 2) если в последовательности имен вычеркиваемых строк или вычеркиваемых столбцов есть одинаковые имена, то кратное алгебраическое дополнение равно нулю:

$$\Delta_{25,24} = 0;$$

- 3) если кратность  $k$  алгебраического дополнения равна порядку исходной матрицы, то кратное алгебраическое дополнение равно  $(-1)^M$ :

$$Y_c = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{array}{|c|c|} \hline 5 & 3 \\ \hline 3 & 4 \\ \hline \end{array} \end{matrix}; \quad \Delta_{12,21} = -1.$$

## Суммарное кратное алгебраическое дополнение

$$\Delta(i_1+i_1')(j_1+j_1'), (i_2+i_2')(j_2+j_2'), \dots, (i_k+i_k')(j_k+j_k')$$

кратности  $k$  тоже вычисляется в четыре этапа:

- 1) строка матрицы с именем  $i_1$  прибавляется к строке матрицы с именем  $i_1'$ , а затем вычеркивается. Аналогичные действия производятся и над остальными парами строк;
- 2) столбец матрицы с именем  $j_1$  прибавляется к столбцу матрицы с именем  $j_1'$ , а затем вычеркивается. Аналогичные действия производятся и над остальными парами столбцов;
- 3) вычисляется определитель матрицы, получившейся после суммирования и вычеркивания строк и столбцов;
- 4) полученное значение определителя домножается на  $(-1)^M$ , где вычисление показателя  $M$  производится так же, как и в случае кратного алгебраического дополнения.

Таким образом, в суммарных алгебраических дополнениях номера строк и столбцов, стоящих справа от знака "+", на величину показателя  $M$  не влияют. На знак суммарного алгебраического дополнения влияют лишь номера строк и столбцов, стоящих слева от знака "+", т.е. номера вычеркиваемых строк и столбцов.

### Свойства суммарных алгебраических дополнений:

- 1) пару имен, разделенных знаком "плюс", можно поменять местами, изменив знак перед суммарным алгебраическим дополнением на противоположный;

$$\Delta_{(1+2)(3+2)} = -\Delta_{(2+1)(3+2)} = \Delta_{(2+1)(2+3)};$$

- 2) если имя строки или столбца, стоящее *справа* от знака "+", такое же, как и какое-либо одиночное имя соответственно строки или столбца, то его можно вычеркнуть из суммарного алгебраического дополнения:

$$\Delta_{(1+2)(4+3),23} = \Delta_{1(4+3),23} = \Delta_{14,23};$$

- 3) если имя строки или столбца, стоящее *слева* от знака "+", такое же, как и какое-либо одиночное имя соответственно строки или столбца, то его можно вычеркнуть из суммарного алгебраического дополнения, изменив знак перед суммарным алгебраическим дополнением на противоположный:

$$\Delta_{(2+1)(3+4),23} = -\Delta_{1(3+4),23} = \Delta_{14,23}.$$

Используя приведенные выше свойства, суммарные кратные алгебраические дополнения приводят к такому виду, который позволяет выполнить требуемые действия над матрицей. Если же суммарное кратное алгебраическое дополнение не удастся привести к выполнимому виду, то оно равно нулю.

Для определения схемных функций систем с многими входами необходимо овладеть аппаратом вычисления суммарных и кратных алгебраических дополнений.

## Задачи и упражнения

4.1. Определить схемные функции системы рис. 4.6, считая  $R5$  сопротивлением нагрузки.

4.2. Определить мощность, выделяемую на сопротивлении  $R4$  рис. 4.7. Сравнить полученное значение с величиной максимальной мощности, которую способна передать в нагрузку система.

4.3. В схеме рис. 4.4 на основе схемных функций определить, потребляет ли какой-либо из источников энергию?

4.4. Рассчитать величину тока через сопротивление  $R1$  рис. 4.5, представив схему как систему с многими входами. Как, используя полученные результаты, представить схему эквивалентным источником тока, считая  $R1$  его нагрузкой?

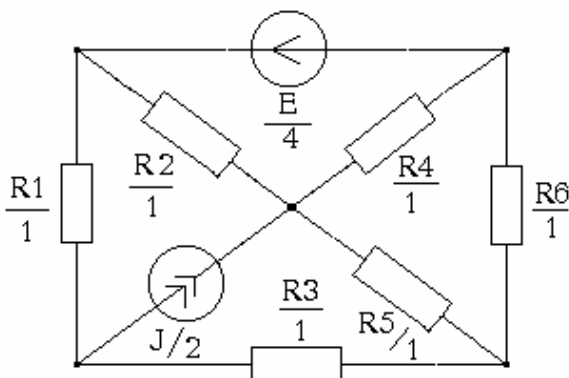


Рис. 4.4

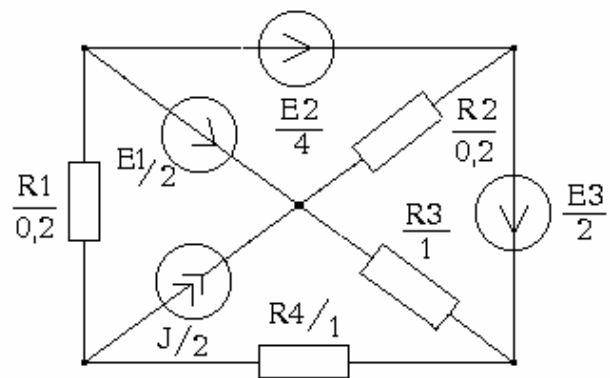


Рис. 4.5

4.5. Каким должно быть напряжение источника  $E$  в схеме рис. 4.6 и ток источника  $J$  в схеме рис. 4.7, чтобы на сопротивлении  $R5$  в каждой схеме выделялась мощность 10 Вт? Каким должно быть сопротивление  $R5$ , чтобы на нем выделялась максимально возможная мощность?

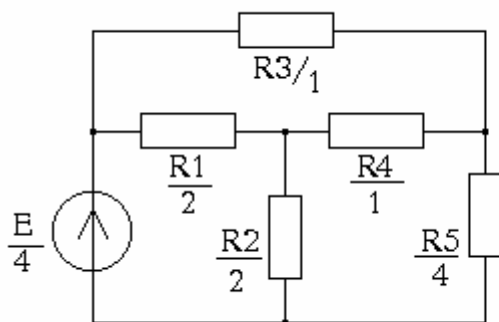


Рис. 4.6

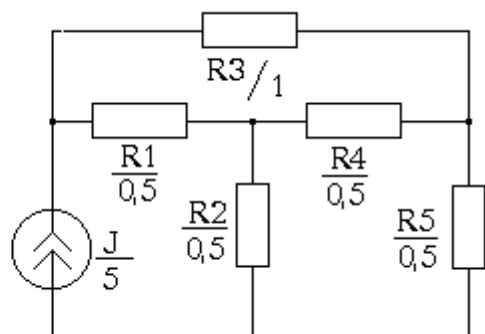


Рис. 4.7

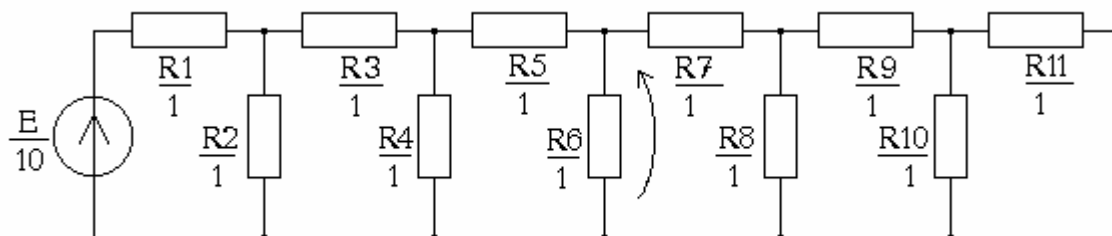


Рис. 4.8

4.6. Рассчитать в схеме рис. 4.8 напряжение на сопротивлении R6, используя схемные функции. Как избежать использования матрицы проводимости выше 4-го порядка?

4.7. Используя схемные функции определить, при каком сопротивлении R6 рис. 4.8 через него будет протекать ток 0,2 А. Каким должно быть сопротивление R6, чтобы ток через него уменьшился в два раза?

4.8. Рассчитать следующие алгебраические дополнения элементов матрицы  $Y_c$ , представленной на рис. 4.9:

$$\Delta_{(1+2)3,(4+5)2}; \quad \Delta_{(1+4)(1+2),(1+3)1}; \quad \Delta_{12,(1+3)4,(1+4)(2+4)};$$

$$\Delta_{(4+5)(1+2),(4+1)2,44}; \quad \Delta_{12,21,33,34}.$$

4.9. Рассчитать следующие алгебраические дополнения элементов матрицы  $Y_c$ , представленной на рис 4.10:

$$\Delta_{(1+2)2,(1+4)(5+6)}; \quad \Delta_{11,(3+4)(5+7)}; \quad \Delta_{12,33,7(1+2)};$$

$$\Delta_{(1+7)(2+6),(3+1)3,(7+4)5}; \quad \Delta_{(1+6)2,6(6+7)}.$$

$$Y_c =$$

	1	2	3	4	5	
1	-1		2		3	1
2	1	2		-1	2	2
3		1	3	1	1	3
4	2	-3		4		4
5		1	2	-3	5	5

Рис. 4.9

$$Y_c =$$

	2	3	5	7	8	
1	5	3	1		-2	1
3		4		2		3
4	-2		-3			4
6	3	1		2		6
7	-1		2	3	-1	7

Рис. 4.10

## 5. СХЕМЫ С НЕЛИНЕЙНЫМ ДВУХПОЛЮСНИКОМ

Для расчета токов и напряжений в схемах, содержащих один нелинейный двухполюсник, необходимо знать графо-аналитический и численные методы решения нелинейного уравнения с одной неизвестной величиной  $F(x) = 0$ , где  $x$ -неизвестная величина;  $F(x)$ -нелинейная функция.

Параллельно-последовательные схемы с несколькими нелинейными двухполюсниками можно свести к схемам с одним эквивалентным нелинейным двухполюсником путем эквивалентных преобразований. Линейная часть схемы с одним нелинейным двухполюсником замещается эквивалентным источником тока или напряжения, нагрузкой которого является эквивалентное нелинейное сопротивление  $R_n$  (рис. 5.1а) или эквивалентная нелинейная проводимость  $G_n$  (рис. 5.1б).

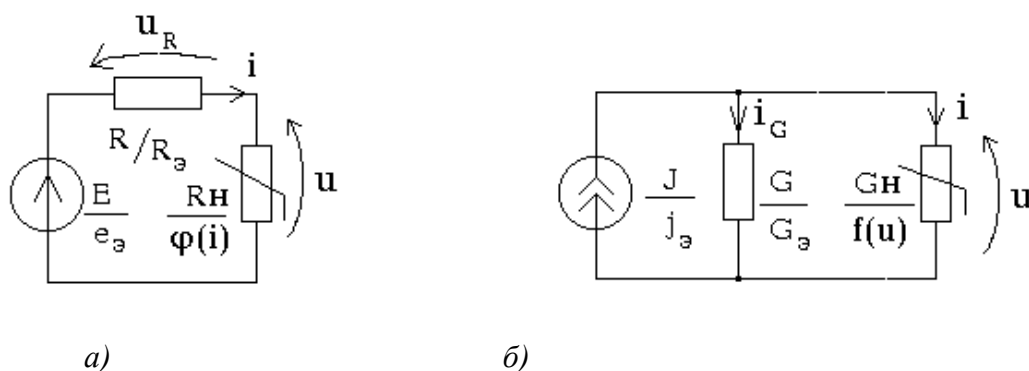


Рис. 5.1. Эквивалентные схемы с нелинейным двухполюсником.

Эквивалентная схема рис. 5.1а описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} e_y - R_y i - u &= 0; \\ u &= \varphi(i), \end{aligned} \quad (5.1)$$

а эквивалентная схема рис. 5.1б - системой уравнений

$$\begin{aligned} G_y u + i - j_y &= 0; \\ i &= f(u). \end{aligned} \quad (5.2)$$

**Графо-аналитический метод** заключается в графическом решении системы уравнений (5.1) или (5.2) на вещественной плоскости  $(u, i)$  (рис. 5.2).

Искомое решение представляет собой координаты точки пересечения линии нагрузки (первое уравнение системы (5.1) или (5.2)) и вольт-амперной характеристики (второе уравнение системы (5.1) или (5.2)). На рис. 5.2-это рабочая точка Q нелинейного двухполюсника с координатами  $i^Q$  и  $u^Q$ .

Токи и напряжения на компонентах исходной схемы определяются после замены по теореме компенсации нелинейного сопротивления  $R_n$  или нелинейной проводимости  $G_n$  идеальным источником напряжения  $e = u^Q$  или идеальным источником тока  $j = i^Q$ , или статическим сопротивлением  $R_{CT} = u^Q / i^Q$ . Такая замена приводит исходную нелинейную схему к линейной.



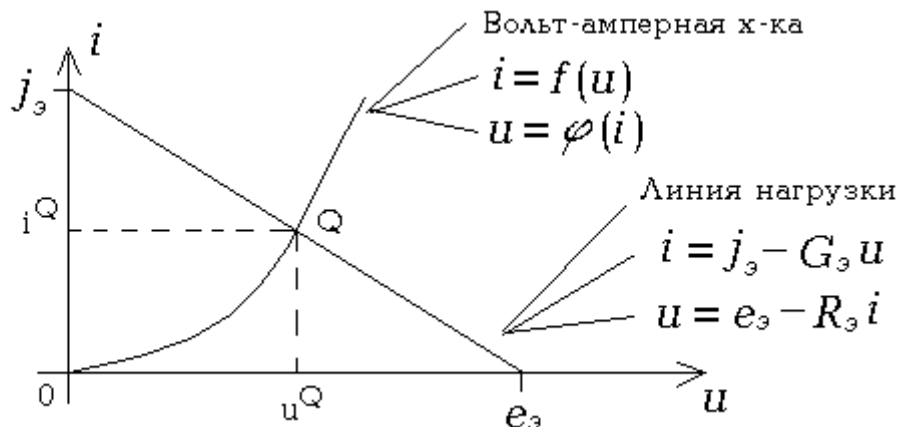


Рис. 5.2. Графическое решение системы двух уравнений.

Более точно координаты рабочей точки Q можно найти путем численного решения системы уравнений (5.1) или (5.2). Подстановка уравнения вольт-амперной характеристики в уравнение линии нагрузки приводит каждую из систем к одному нелинейному уравнению  $F(x)=0$ :

$$F(x) = e_{\dot{y}} - i R_{\dot{y}} - j(i) = 0, \quad (5.3)$$

где  $x=i$  или

$$F(x) = G_{\dot{y}} u + f(u) - j_{\dot{y}} = 0, \quad (5.4)$$

где  $x=u$ .

**Метод Ньютона - Рафсона** применяется для численного решения уравнения  $F(x)=0$  по следующей итерационной формуле:

$$x^{(m+1)} = x^{(m)} - \frac{F(x^{(m)})}{F'_x(x^{(m)})}; \quad m = 0, 1, 2, \dots,$$

где  $m$  - итерационный индекс,  $x^{(0)}$  - начальное приближение,  $F'_x(x^{(m)})$  - производная функции  $F(x)$  по  $x$ .

**Метод простой итерации** предназначен для численного решения уравнения  $F(x)=0$  по следующей итерационной формуле:

$$x^{(m+1)} = \hat{O}(x^{(m)}),$$

где  $\Phi(x)=j_э-G_э\varphi(i)$ ,  $x=i$  или  $\Phi(x)=e_э-R_эф(u)$ ,  $x=u$ .

Абсолютная погрешность на  $(m+1)$ -й итерации оценивается выражением

$$\varepsilon^{(m+1)} \leq |x^{(m+1)} - x^{(m)}|,$$

а невязка приближенного решения нелинейного уравнения определяется по следующей формуле:

$$e^{(m+1)} = |F(x^{(m+1)})|.$$

Линеаризованная вольт-амперная характеристика служит основой для построения приближенной линейной модели нелинейного двухполюсника. Такой характеристикой в окрестности рабочей точки Q может служить, например, касательная к вольт-амперной характеристике в точке Q (рис. 5.3).

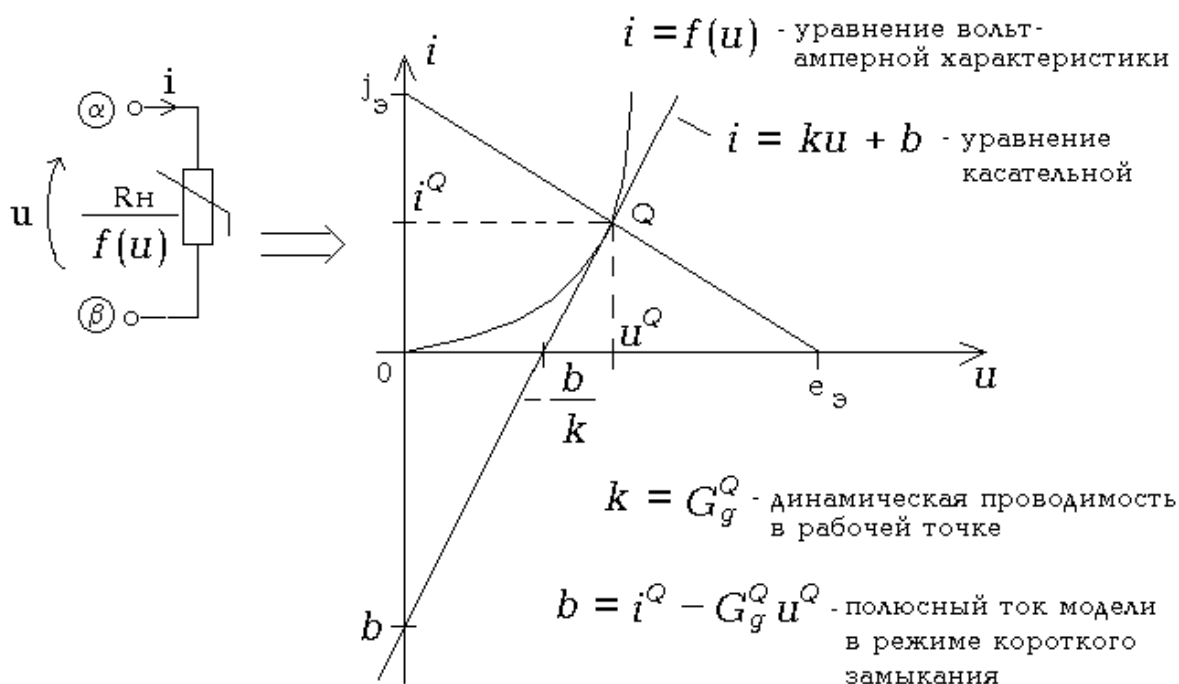


Рис. 5.3. Линеаризация вольт-амперной характеристики нелинейного сопротивления  $R_H$ .

Уравнение касательной приведено на том же рисунке. Оно рассматривается как уравнение вольт-амперной характеристики линейной модели и используется для построения линейных схемных моделей нелинейного двухполюсника (рис. 5.4).

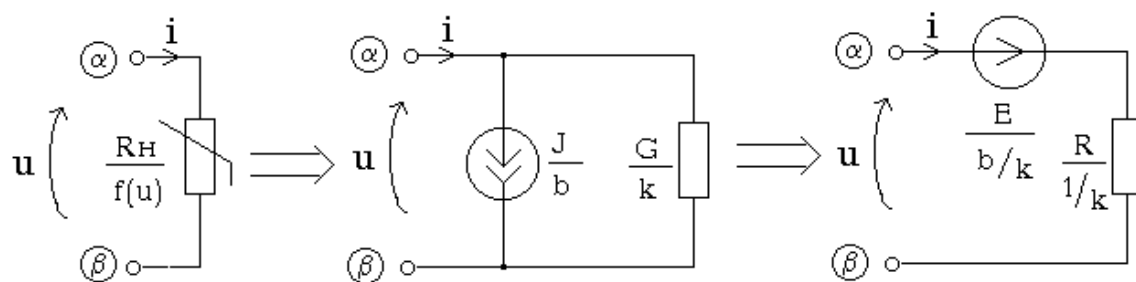


Рис. 5.4. Линейные схемные модели нелинейного сопротивления  $R_H$ .

Погрешность линейной модели графически представляется как отличие ее вольт-амперной характеристики - прямой линии - от вольт-амперной характеристики нелинейного двухполюсника. Для приведенного примера (рис. 5.3) погрешность линейной модели нелинейного двухполюсника равна нулю в рабочей точке Q и увеличивается по мере удаления от рабочей точки.

### Задачи и упражнения

5.1. Определить координаты рабочей точки Q нелинейного сопротивления (рис. 5.5) графо-аналитическим методом и методом Ньютона-Рафсона с погрешностью 1%, если уравнение ВАХ имеет следующий вид:  $i = 2u^3 + u$ .

5.2. Для схемы рис. 5.6 изобразить графически на интервале, равном периоду, следующие сигналы:  $e(t)$ ,  $u(t)$ ,  $i(t)$ . Чем вызвано отличие форм сигналов?

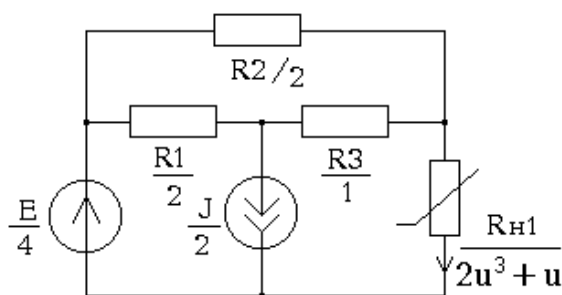


Рис. 5.5

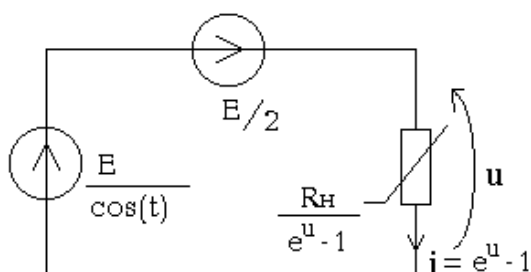


Рис. 5.6

5.3. Рассчитать все токи и напряжения в схеме рис. 5.7 с погрешностью 1%, если вольт-амперные характеристики описываются следующими соотношениями:  $u_{i1} = i_{i1}^3 + i_{i1}$ ;  $u_{i2} = 3i_{i2}^3$ .

5.4. Определить максимальное и минимальное значение тока через диод за время, равное периоду сигнала источника E (рис. 5.8).

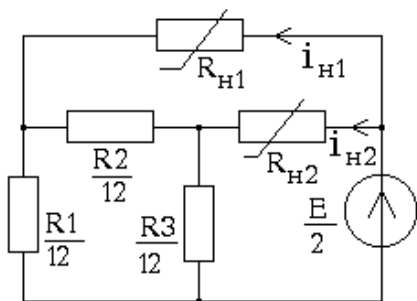


Рис. 5.7

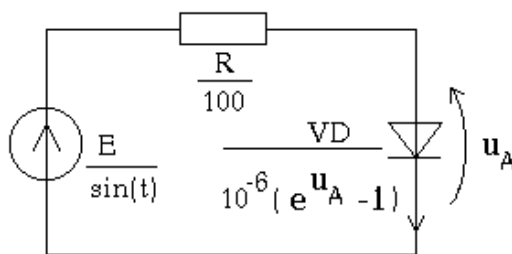


Рис. 5.8

5.5. Выполнить кусочно-линейную аппроксимацию вольт-амперной характеристики нелинейного сопротивления  $u_i = i_i^3 + i_i$  (рис. 5.9) с абсолютной погрешностью 0,1 В,

ограничившись двумя отрезками влево и вправо от рабочей точки. В каком интервале может изменяться ток  $j$  независимого источника, чтобы рабочая точка не выходила за пределы аппроксимированного участка ВАХ?

5.6. Рассчитать в схеме рис. 5.10 все токи и напряжения. Определить статические и динамические параметры нелинейных сопротивлений в рабочих точках.

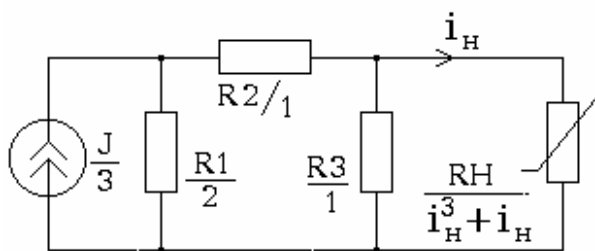


Рис. 5.9

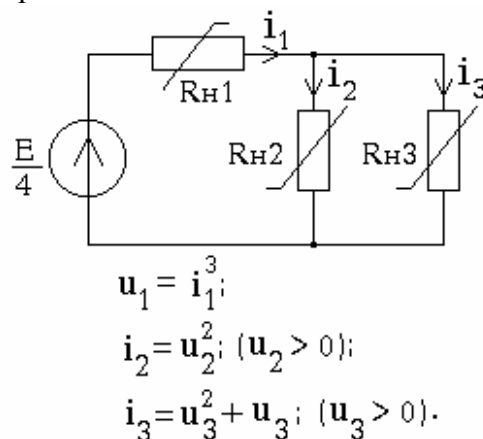


Рис. 5.10

5.7. Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления схемы рис. 5.11 выражается зависимостью  $i_i = u_i^5 + u_i$ . Определить ток источника, при котором динамическая проводимость в рабочей точке равнялась бы 5 См?

5.8. Построить линейную схемную модель, соответствующую моменту времени, в который ток в нагрузке максимален (рис. 5.12), если напряжение источника имеет следующий вид:  $e(t) = 3\sin(t)$ . Какая часть мощности источника сигнала выделяется в нагрузку в этот момент времени?

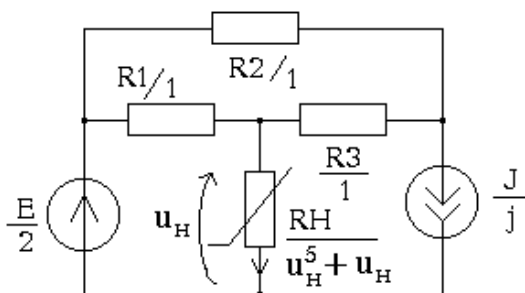


Рис. 5.11

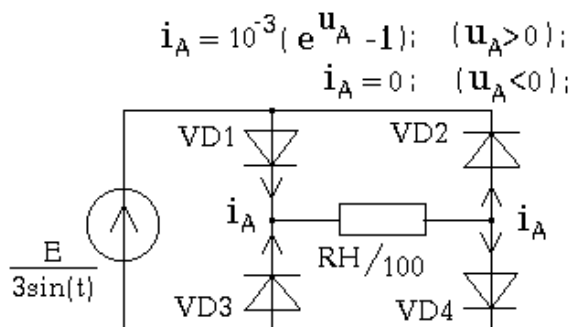


Рис. 5.12

## 6. СХЕМЫ С МНОГОПОЛЮСНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

Многополюсные компоненты (многополюсники) соединяются с другими компонентами схемы при помощи полюсов, количество которых больше двух. К многополюсным компонентам относятся такие конструктивно неделимые компоненты как транзисторы, трансформаторы, микросхемы и т.д. . Минимальное количество полюсов имеет трехполюсный компонент (трехполюсник) (рис. 6.1).

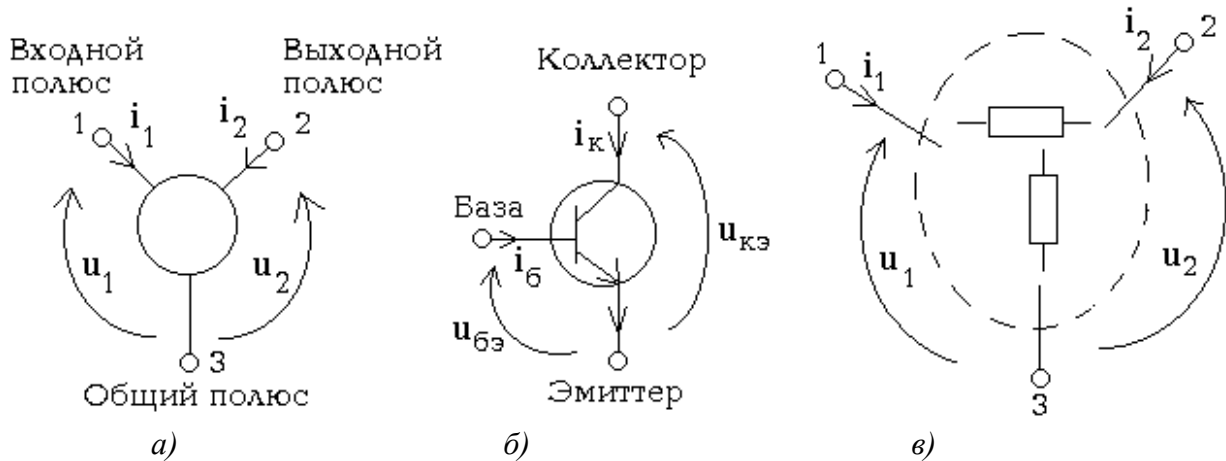


Рис. 6.1. Трехполюсник а) обобщенный, б) *n-p-n* транзистор, в) подсхема.

Часть схемы (подсхему), отделенную от остальной части схемы сечением, которому инцидентно больше двух полюсов, тоже можно считать многополюсным компонентом схемы, составленным из более простых компонентов (рис. 6.1в).

Для анализа схем с многополюсными компонентами необходимо знать компонентные уравнения. Линейные многополюсники описываются линейными компонентными уравнениями. Компонентные уравнения обобщенного трехполюсника в этом случае представляют собой систему из двух линейных уравнений, связывающих между собой полюсные токи  $i_1, i_2$  и полюсные напряжения  $u_1, u_2$  (рис. 6.1.). Например:

$$\begin{aligned} i_1 &= g_{11}u_1 + g_{12}u_2; \\ i_2 &= g_{21}u_1 + g_{22}u_2; \\ u_1 &= r_{11}i_1 + r_{12}i_2; \\ u_2 &= r_{21}i_1 + r_{22}i_2; \\ u_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}u_2; \\ i_2 &= h_{21}i_1 + h_{22}u_2. \end{aligned} \tag{6.1}$$

Всего можно записать шесть систем компонентных уравнений. Четыре коэффициента в компонентных уравнениях линейного трехполюсника называются параметрами трехполюсника. Разные группы из четырех параметров (*g*-параметры, *h*-параметры и т.д.) связаны между собой. Одну группу (систему) параметров можно выразить через другую систему параметров (табл. 10.6, с. 55).

Компонентные уравнения трехполюсника позволяют построить схемные модели трехполюсника с двумя зависимыми источниками (табл. 10.8, с. 56), а также П-образную и Т-образную схемные модели с одним зависимым источником (табл. 10.9, с. 56).

Для анализа схем с многополюсными компонентами узловым методом выполняют замену многополюсников их схемными моделями. В результате замены в схеме появляются зависимые источники, количество типов которых равно четырем. Учет зависимых источников в узловой модели производится по соответствующим алгоритмам (табл. 10.10, с. 57).

Например: в схеме имеется источник напряжения, управляемый током (рис. 6.2). Источник напряжения включен между узлами 1 и 3. Управляющий ток  $i$  протекает по короткозамкнутой дуге от узла 4 к узлу 6. Тогда в соответствии с алгоритмом учета такого источника необходимо заменить строки 1 и 3 матрицы проводимости  $Y$  их суммой. Аналогичным образом надо поступить и со столбцами 4 и 6 матрицы  $Y$ . Величину  $1/r$ , где  $r$  – управляющий параметр источника, необходимо добавить с соответствующим знаком к элементам  $Y_{41}$ ,  $Y_{61}$ ,  $Y_{43}$  и  $Y_{63}$  матрицы  $Y$ .

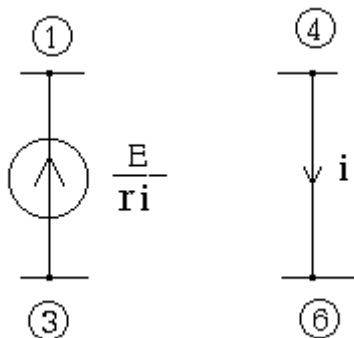


Рис. 6.2. Источник напряжения, управляемый током.

Модифицируются также вектор узловых напряжений  $V$  (в соответствии с изменениями в столбцах матрицы  $Y$ ) и задающий вектор  $J$  (в соответствии с изменениями в строках матрицы  $Y$ ).

В (табл. 10.11, с. 58) показаны алгоритмы учета в узловой модели таких многополюсных компонентов как операционный усилитель, гиратор, циркулятор и др. Очередность учета зависимых источников в узловой модели не имеет значения.

Если известны  $g$ -параметры трехполюсника, то для его учета в узловой модели можно не прибегать к замене трехполюсника схемной моделью. В этом случае (табл. 10.12, 10.13, с. 59):

- строят расширенную матрицу  $g$ -параметров трехполюсника,
- определяют полюсное отображение, т.е. устанавливают соответствие между полюсами трехполюсника и узлами схемы,
- элементы расширенной матрицы  $g$ -параметров трехполюсника добавляют к элементам матрицы проводимости в соответствии с полюсным отображением.

Если трехполюсный компонент представляет собой трехполюсную подсхему, состоящую из произвольного количества компонентов и содержащую произвольное количество внутренних узлов, то его параметры можно определить по матрице проводимости трехполюсника  $Y_T$  (табл. 10.8, с. 56).

В табл. 10.8 приведены формулы для случая, когда общий полюс трехполюсника соответствует базисному узлу при формировании матрицы проводимости трехполюсника  $Y_T$ . Причем узел трехполюсной подсхемы, соответствующий входному полюсу трехполюсника, считается обозначенным символом 1, а узел трехполюсной подсхемы, соответствующий выходному полюсу трехполюсника, считается обозначенным символом 2.

Замена трехполюсной подсхемы, например, П-образной схемной моделью позволяет уменьшить количество узлов в исходной схеме на величину, равную количеству внутренних узлов трехполюсной подсхемы. Последовательная замена многополюсных подсхем их схемными моделями позволяет уменьшить размер анализируемой схемы и сократить затраты на численное решение узловых уравнений или вычисление схемных функций.

Конструктивно неделимые трехполюсники, например, биполярные транзисторы, являются нелинейными компонентами электронной техники. Их компонентные уравнения представляют собой довольно сложные выражения. Их трудно получить с требуемой точностью. Поэтому вместо компонентных уравнений используются семейства входных и выходных характеристик, которые получаются путем измерений полюсных токов и напряжений (рис. 6.3).

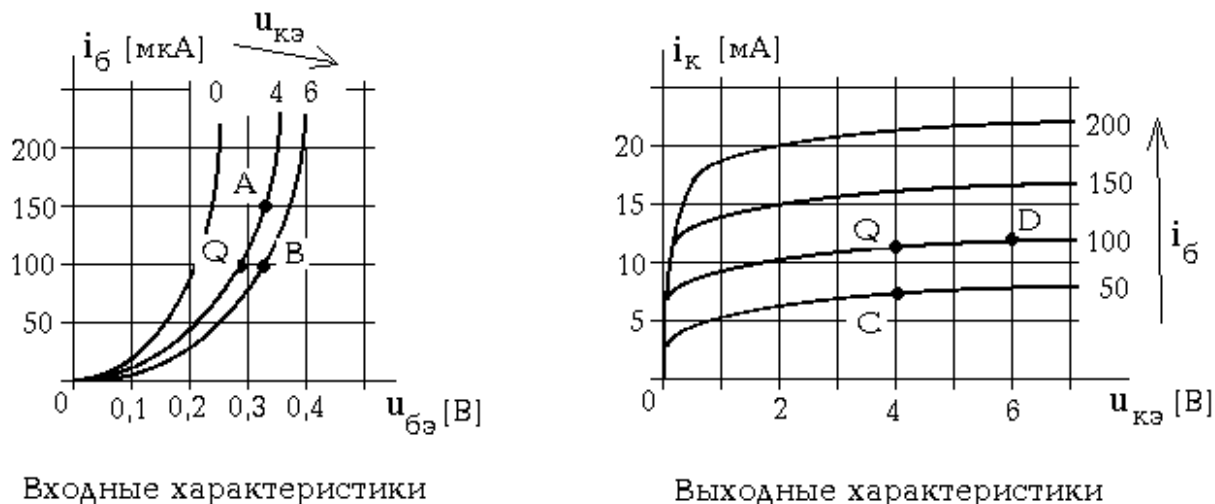


Рис. 6.3. Семейства характеристик биполярного  $p-n-p$  транзистора

Рабочая точка  $Q$  имеет координаты, равные некоторым зафиксированным полюсным токам и напряжениям трехполюсника. В реальных цепях эта фиксация координат рабочей точки осуществляется при помощи источника питания и резисторов смещения.

В окрестности рабочей точки  $Q$  нелинейный трехполюсник можно приближенно описать линейными компонентными уравнениями, связывающими приращения полюсных токов и напряжений относительно координат рабочей точки. Для приведенного на рис. 6.3 примера эти уравнения в  $h$ -параметрах имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}\Delta u_{\bar{o}\bar{e}} &= h_{11}^{\partial} \Delta i_{\bar{o}} + h_{12}^{\partial} \Delta u_{\bar{k}\bar{e}}; \\ \Delta i_{\bar{k}} &= h_{21}^{\partial} \Delta i_{\bar{o}} + h_{22}^{\partial} \Delta u_{\bar{k}\bar{e}}.\end{aligned}\tag{6.2}$$

Верхний индекс  $g$  подчеркивает то обстоятельство, что  $h$ -параметры трехполюсника связывают не полюсные токи и напряжения как в (6.1), а их приращения  $\Delta$ . В этом случае параметры трехполюсника называются *динамическими*.

Из уравнений в динамических h-параметрах (6.1) можно получить соотношения, позволяющие определить динамические h-параметры по характеристикам транзистора через приращения полюсных токов и напряжений в окрестности рабочей точки Q (рис. 6.3):

$$\Delta u_{кэ} = 0 \Rightarrow h_{11}^{\partial} = \frac{\Delta u_{бэ}}{\Delta i_{б}} = \frac{u_{бэ}^A - u_{бэ}^Q}{i_{б}^A - i_{б}^Q};$$

$$\Delta u_{кэ} = 0 \Rightarrow h_{21}^{\partial} = \frac{\Delta i_{к}}{\Delta i_{б}} = \frac{i_{к}^C - i_{к}^Q}{i_{б}^C - i_{б}^Q};$$

$$\Delta i_{б} = 0 \Rightarrow h_{12}^{\partial} = \frac{\Delta u_{бэ}}{\Delta u_{кэ}} = \frac{u_{бэ}^B - u_{бэ}^Q}{u_{кэ}^B - u_{кэ}^Q};$$

$$\Delta i_{б} = 0 \Rightarrow h_{22}^{\partial} = \frac{\Delta i_{к}}{\Delta u_{кэ}} = \frac{i_{к}^D - i_{к}^Q}{u_{кэ}^D - u_{кэ}^Q}.$$

Рассчитанные таким образом динамические h-параметры характеризуют транзистор, в котором общим полюсом является эмиттер, т.к. характеристики, использованные для определения параметров, были измерены при общем эмиттере. Это обстоятельство легко установить из обозначения напряжений на осях, в которых построены характеристики транзистора.

*Знание общего полюса в модели транзистора важно как для правильного определения полюсного отображения при учете g-параметров транзистора в узловой модели, так и для правильной замены транзистора в схеме его схемной моделью.*

## Задачи и упражнения

6.1. Определить динамические h - параметры транзистора, вольт-амперные характеристики которого изображены на рис. 6.3, если рабочая точка Q имеет следующие значения координат:  $i_{к}=16$  мА,  $u_{кэ}=6$  В.

Выразить g-параметры транзистора через h-параметры. Можно ли определить динамические g-параметры транзистора непосредственно по приведенным характеристикам?

6.2. Используя результаты решения задачи 6.1, рассчитать напряжение на сопротивлении  $R_H$ , величина которого согласована с выходным сопротивлением усилителя (рис. 6.4). Чему равен коэффициент передачи тока в этой схеме?



6.3. Рассчитать сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  в усилителе (рис. 6.5), если рабочая точка транзистора (рис. 6.3) должна иметь следующие координаты  $i_0=150$  мкА;  $u_{03}=0,21$  В. Чему равна мощность в нагрузке, если ее сопротивление согласовано с выходным сопротивлением усилителя, а на входе действует источник напряжения  $e=1$  В.

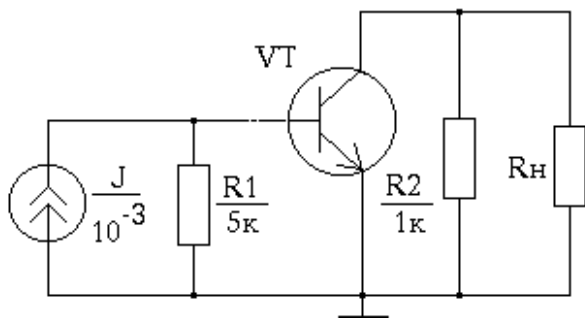


Рис. 6.4

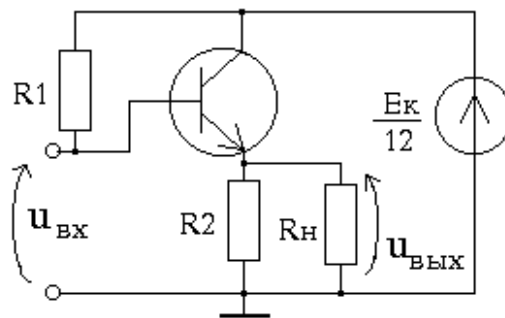


Рис. 6.5

6.4. Определить напряжение  $u$  в схеме рис. 6.6 наиболее экономичным способом.

6.5. Рассчитать все схемные функции ( $R_{ВХ}$ ,  $R_{ВЫХ}$ ,  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $Y_{пер}$ ,  $Z_{пер}$ ) для схемы рис. 6.7, если динамические  $g$ -параметры транзистора имеют следующие значения:  $g_{113}=10^{-3}$  См;  $g_{123}=-0,1 \cdot 10^{-7}$  См;  $g_{213}=0,2$  См;  $g_{223}=1 \cdot 10^{-5}$  См.

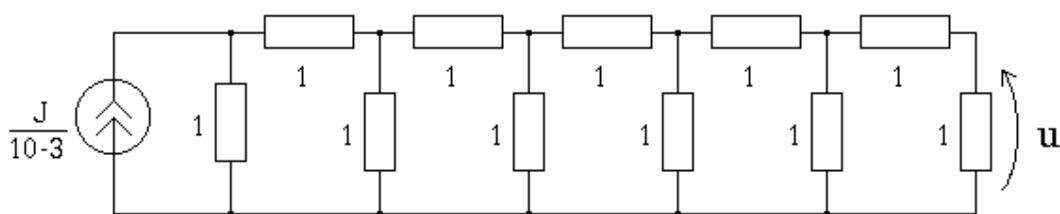


Рис. 6.6

6.6. Определить, какое сопротивление необходимо подключить одним полюсом к узлу 1 схемы рис. 6.8, чтобы сопротивление между его вторым полюсом и базисным узлом схемы стало равным 10 кОм.

6.7. Обратим ли трехполюсник, изображенный на рис. 6.9, если каждый из входящих в него трехполюсников имеет одни и те же  $g$ -параметры? Определить параметры  $\Pi$ -образной схемной модели этого трехполюсника.

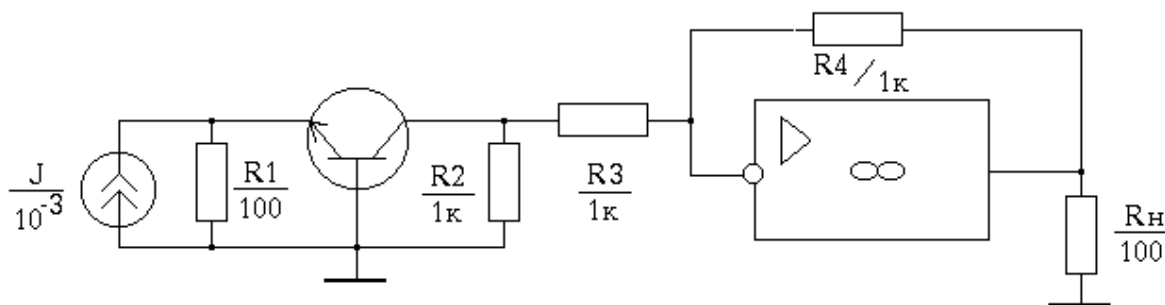


Рис. 6.7

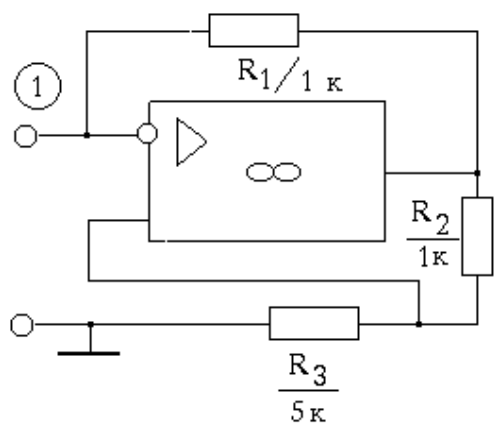


Рис. 6.8

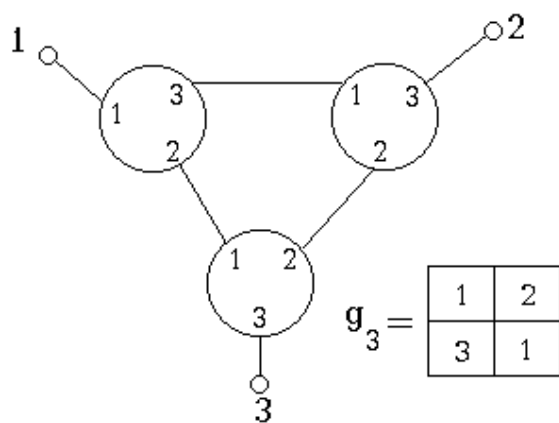


Рис. 6.9

6.8. Проверить справедливость теоремы Теллегена для схемы рис. 6.10.

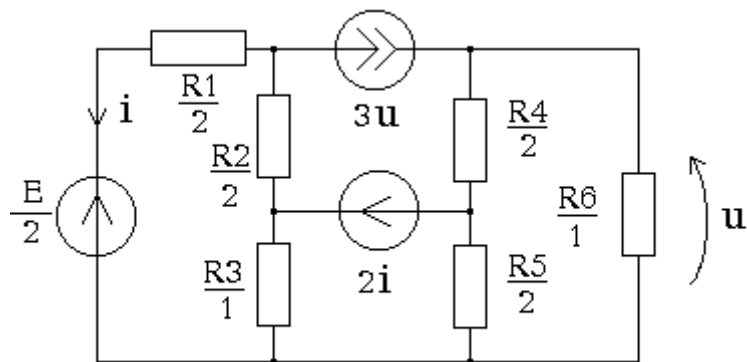


Рис. 6.10

6.9. Если к полюсам 1 и 3 трехполюсника рис. 6.9 подключить источник напряжения  $e=10$  В, то чему будет равно напряжение  $u_{23}$ ? Чему будет равно это же напряжение, если вместо источника напряжения подключить источник тока  $j=10$  А?

6.10. Решить задачу 6.5, подключив в схеме 6.7 эмиттер к общему узлу схемы, а базу - на место эмиттера. Изменились ли значения схемных функций?

## 7. МЕТОД СИГНАЛЬНЫХ ГРАФОВ

Токи и напряжения в линейных резистивных схемах можно определить методом сигнальных графов. Для его применения необходимо знать, как по принципиальной схеме построить сигнальный граф и как определить передачу между заданными вершинами.

Сигнальный граф строится на основе причинно-следственных зависимостей, которые, в свою очередь, записываются по законам Кирхгофа и компонентным уравнениям (закон Ома, уравнение линейного трехполюсника и т.п.). Токи и напряжения, входящие в причинно-следственные зависимости, должны быть обязательно обозначены на анализируемой схеме стрелками.

Первой записывается причинно-следственная зависимость для искомой электрической величины  $X_{иск}$  - тока или напряжения. Например:

$$X_{вых} = \sum_{k=1}^l \alpha_k i_k + \sum_{s=1}^m \beta_s u_s; \quad (7.1)$$

где в правой части записано компонентное уравнение или уравнение по первому закону Кирхгофа (тогда все  $\beta_s=0$ ), или уравнение по второму закону Кирхгофа (тогда все  $\alpha_s=0$ ).

Аналогичным образом записываются причинно-следственные зависимости для всех  $i_k$  и  $u_s$ , за исключением тех токов и напряжений, которые являются сигналами независимых источников. Записывая очередную причинно-следственную зависимость, необходимо по мере возможности использовать те токи и напряжения, которые уже вошли в предыдущие причинно-следственные зависимости, или сигналы независимых источников. Если это требование выполнить невозможно - вводятся новые токи и напряжения.

Для введенных новых токов и напряжений тоже записываются причинно-следственные зависимости с соблюдением описанного выше правила. Процесс записи причинно-следственных зависимостей продолжается до тех пор, пока их количество не станет равным количеству *неизвестных* токов и напряжений, фигурирующих во всех записанных причинно-следственных зависимостях.

По записанным причинно-следственным зависимостям строится сигнальный граф, вершины которого соответствуют токам и напряжениям, взятым из причинно-следственных зависимостей, а передачи дуг - коэффициентам при токах и напряжениях. Необходимо направлять дуги сигнального графа к вершине, соответствующей току или напряжению, записанному в причинно-следственной зависимости слева от знака равенства.

Второй способ построения сигнального графа основан на использовании в качестве причинно-следственных зависимостей узловых уравнений или других формализованных математических моделей схемы (контурных уравнений, гибридных уравнений и т.п.). Записанные по формальным правилам уравнения необходимо привести к форме причинно-следственных зависимостей. Построенный по ним граф называется нормализованным.

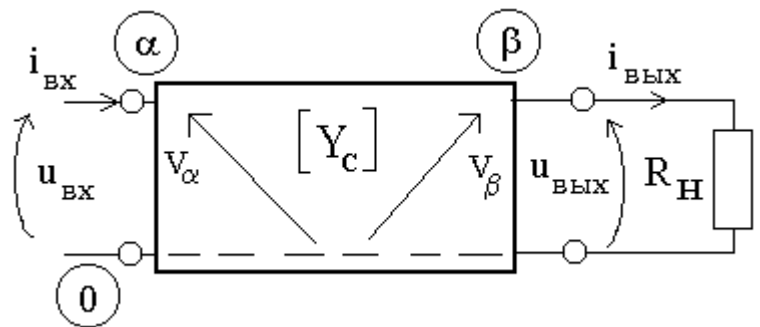


Рис. 7.1

Если нормализованный сигнальный граф строится по узловым уравнениям *системы типа уравновешенный четырехполюсник* (рис. 7.1), то его вершинами будут узловые напряжения  $V_s$ , ( $s=1,2,\dots,n$ ;  $n$ -количество узлов в схеме кроме базисного), ток входа  $i_{вх}$ , ток выхода  $i_{вых}$ , напряжение  $u_{вх}$  и напряжение  $u_{вых}$ .

Вершины узловых напряжений соединяются дугами с передачами  $K_{ij}$ . Передача дуги  $K_{ij}$ , направленной от вершины  $V_j$  к вершине  $V_i$ , определяется через соответствующие элементы матрицы проводимости внутренней части системы  $Y_c$  следующим образом:

$$K_{ij} = -\frac{Y_{ij}}{Y_{ii}}. \quad (7.2)$$

Вершинам  $i_{вх}$ ,  $i_{вых}$ ,  $u_{вх}$  и  $u_{вых}$  нормализованного сигнального графа инцидентны дуги, которые определяются по следующим причинно-следственным зависимостям:

$$\begin{aligned} u_{вх} &= V_\alpha; \\ V_\alpha &= \dots + \frac{1}{Y_{\alpha\alpha}} \cdot i_{вх}; \\ u_{вых} &= V_\beta; \\ V_\beta &= \dots - \frac{1}{Y_{\beta\beta}} \cdot i_{вых}; \\ i_{вых} &= G \cdot u_{вых}. \end{aligned} \quad (7.3)$$

В результате получается нормализованный сигнальный граф уравновешенного четырехполюсника (табл. 10.14, с. 60). Для построения нормализованного сигнального графа системы с двумя сторонами типа проходной четырехполюсник необходимо также пользоваться соотношением (7.2), а вершины, соответствующие токам и напряжениям сторон системы, соединяются дугами так, как показано в табл. 10.14 (с. 60). Там же приведен нормализованный сигнальный граф, построенный по узловой модели схемы  $YV=J$ . В этом случае передачи дуг графа определяются по формуле (7.2) с использованием элементов матрицы проводимости узловой модели  $Y$ .

При формировании матриц  $Y_c$  или  $Y$  может оказаться, что строка и столбец с одинаковыми *порядковыми номерами* имеют разные имена. В этом случае необходимо заменить имя строки на имя соответствующего столбца. В результате все строки будут иметь те же имена, что и столбцы. После этого можно определять передачи дуг графа по формуле (7.2).

После построения сигнального графа можно приступить к определению требуемой передачи графа  $K$  от источника  $X_{ист}$  к вершине, соответствующей искомому току или напряжению  $X_{иск}$ . Такая вершина называется стоком и соответствующий ей сигнал обозначим  $X_{ст}$  (рис. 7.2а).

Определение требуемой передачи методом эквивалентных преобразований сигнального графа сводится к последовательному исключению всех вершин графа, кроме источника и стока (табл. 10.15, с. 61).

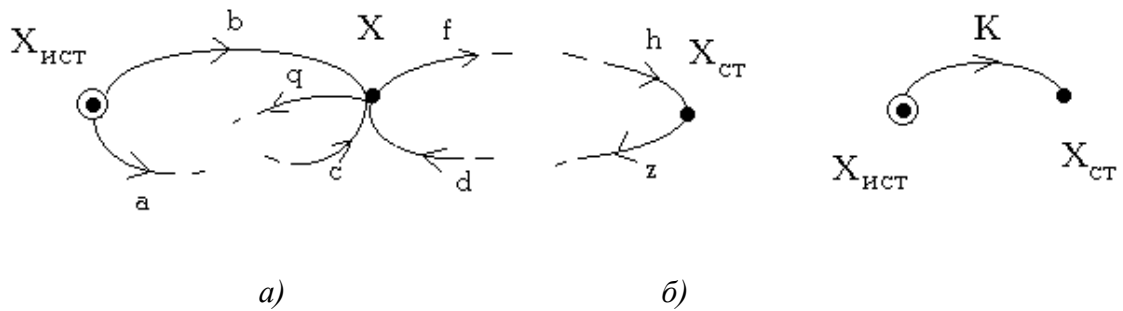


Рис. 7.2

Передача единственной оставшейся дуги, связывающей вершины источника  $X_{ист}$  и стока  $X_{ст}$ , и будет искомой передачей графа  $K$  (рис. 7.2б). Тогда

$$X_{ст} = K \cdot X_{ист}. \quad (7.4)$$

Передачу сигнального графа  $K$  от источника к стоку можно определить и по формуле Мэзона, которая применяется для исходного графа и не требует выполнения эквивалентных преобразований:

$$K = \frac{X_{ст}}{X_{ист}} = \frac{\sum_{s=1}^l P_s \cdot D_s}{D}, \quad (7.5)$$

где  $P_s$  - передача  $s$ -го сквозного пути сигнального графа от  $X_{ист}$  к  $X_{ст}$ ;  
 $D_s$  - дополнение  $s$ -го сквозного пути;  
 $l$  - количество сквозных путей от  $X_{ист}$  к  $X_{ст}$ ;  
 $D$  - определитель сигнального графа, который находится по следующей формуле:

$$D = 1 - \sum_r L_r^{(1)} + \sum_k L_k^{(2)} - \sum_m L_m^{(3)} + \dots \quad (7.6)$$

где

$L_r^{(1)}$  - передача  $r$ -го контура графа;  
 $L_k^{(2)}$  - произведение передач  $k$ -й пары непересекающихся контуров;  
 $L_m^{(3)}$  - произведение передач  $m$ -й тройки непересекающихся контуров и т.д.

Если требуется найти передачу графа  $K$  между парой вершин, ни одна из которых не является источником (например, передачу от вершины  $X$  к вершине  $X_{ст}$ , рис. 7.2а), то в процессе эквивалентных преобразований сигнального графа необходимо выполнить замену источника (табл. 10.15, с. 61). Вначале источником должна стать вершина, ближайшая к  $X_{ист}$ , затем вершина, ближайшая к новому источнику и т.д., пока источником не станет вершина  $X$ .

Можно также воспользоваться формулой замены источника, не требующей выполнения преобразования исходного графа. Например: передача графа от вершины  $X$  к вершине  $X_{CT}$  (рис. 7.2а) по формуле замены источника находится следующим образом :

$$K = \frac{X_{CT}}{X} = \frac{\sum_{s=1}^l P_s \cdot D_s}{\sum_{q=1}^n P_q \cdot D_q}, \quad (7.7)$$

где числитель определяется так же, как и в формуле Мэсона (7.4);

$P_q$  - передача  $q$ -го сквозного пути сигнального графа от  $X_{ИСТ}$  к  $X$ ;

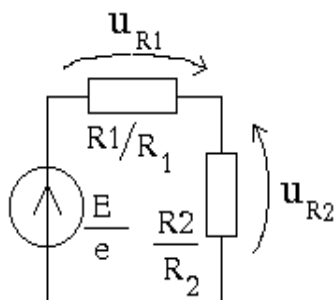
$D_q$  - дополнение  $q$ -го сквозного пути;

$n$  - количество сквозных путей от  $X_{ИСТ}$  к  $X$ ;

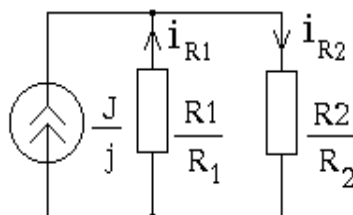
## Задачи и упражнения

7.1. Определить методом сигнальных графов коэффициент деления напряжения (схема рис. 7.3а) и коэффициент деления тока (схема рис. 7.3б).

7.2. Рассчитать в схеме рис. 7.4 напряжение на сопротивлении  $R_2$ .



а)



б)

Рис. 7.3

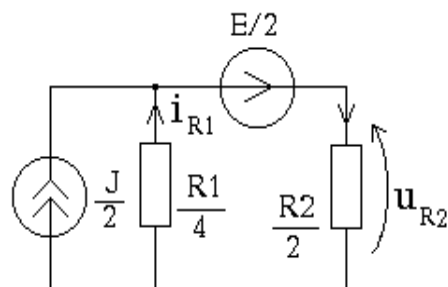
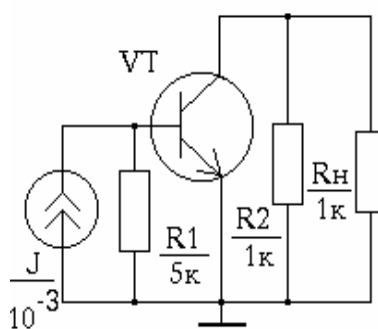
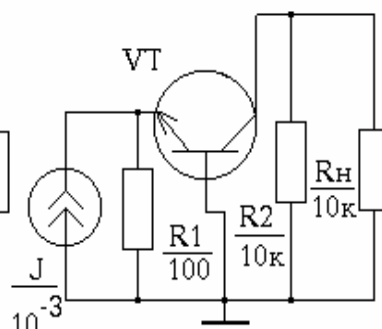


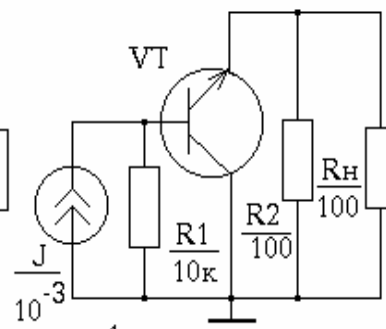
Рис. 7.4



а)



б)



в)

Рис. 7.5

7.3. Определить величину тока в нагрузке  $R_H$  для каждого из усилителей (рис. 7.5), если линейная модель транзистора имеет следующие  $g_3$  - параметры:  $g_{11_3}=3 \cdot 10^{-3}$  См;  $g_{12_3}=-1 \cdot 10^{-7}$  См;  $g_{21_3}=0,25$  См;  $g_{22_3}=0,2 \cdot 10^{-6}$  См. Сравнить усилители по коэффициенту передачи тока.

7.4. Определить коэффициент передачи напряжения в схеме рис. 7.6, используя обычный и нормализованный сигнальные графы. Сравнить полученные результаты.

7.5. Рассчитать коэффициент передачи напряжения в схеме рис. 7.7 методом нормализованных сигнальных графов и построить зависимость  $K_u=f(R_2)$ .

7.6. Определить величину тока  $i_{R2}$  в схеме рис. 7.8, если на входе действует источник напряжения  $u_{ВХ}=2$  В. При каком значении  $\mu$  величина тока  $i_{R2}$  будет равна 1 А?

7.7. Рассчитать величину тока в нагрузке (схема рис. 7.9), если  $h_3$ -параметры транзистора в его рабочей точке имеют следующие значения:  $h_{113}=500$  Ом;  $h_{123}=5 \cdot 10^{-4}$ ;  $h_{213}=50$ ;  $h_{223}=0,8 \cdot 10^{-4}$  См.

7.8. Определить сопротивление нагрузки  $R_H$ , согласованное с выходным сопротивлением усилителя (рис. 7.9), если параметры транзистора те же, что и в задаче 7.7.

7.9. Рассчитать в схемах рис. 7.5 напряжение на нагрузке  $R_H$ , которое будет иметь место в схеме, если источник тока заменить источником напряжения  $e=1$  мВ. Сравнить усилители по коэффициенту передачи напряжения. Значения параметров транзистора взять из задачи 7.3.

7.10. Определить в схеме рис. 7.9 коэффициент передачи напряжения между входом операционного усилителя и нагрузкой, используя нормализованный сигнальный граф.

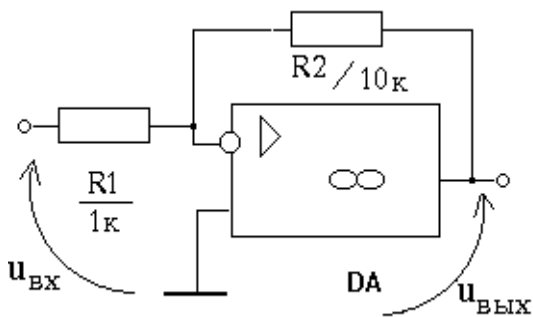


Рис. 7.6

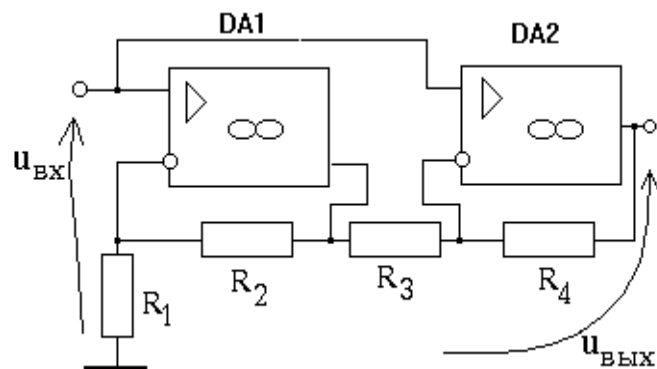


Рис. 7.7

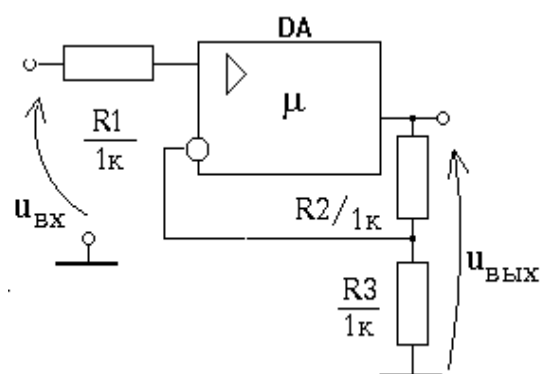


Рис. 7.8

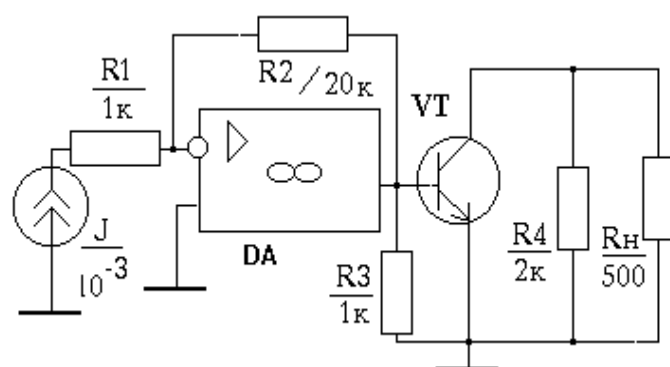


Рис. 7.9

## 8. ГИБРИДНЫЙ МЕТОД

Для расчета токов и напряжений в схемах, содержащих помимо линейных компонентов произвольное количество нелинейных *двухполюсников*, можно использовать гибридный метод. Его практическое применение требует умения формировать и решать гибридные уравнения. Гибридные уравнения нелинейны и решаются только численными методами.

Для формирования гибридных уравнений необходимо нелинейную схему представить как систему с многими сторонами. В качестве сторон системы выбираются нелинейные

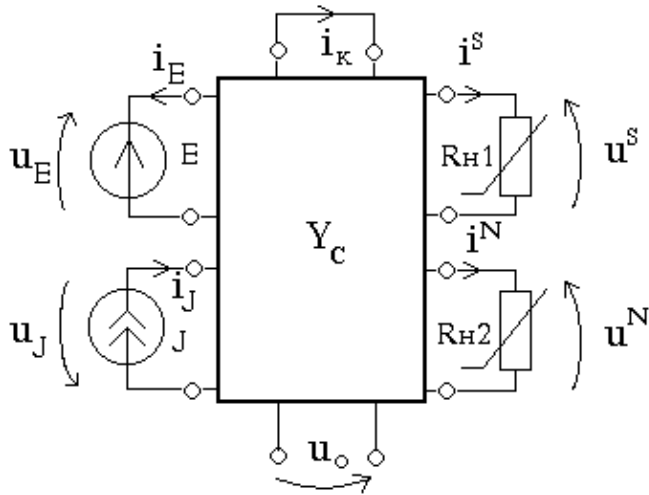


Рис. 8.1

двухполюсники и независимые источники тока и напряжения (рис. 8.1). Рекомендуется также ввести специальные стороны системы для попутного определения искомых токов и напряжений. Такими сторонами являются короткозамкнутые дуги искомых токов  $i_k$  и разомкнутые дуги искомых напряжений  $u_o$  (табл. 10.16, с. 62).

Токи и напряжения сторон системы разбиваются на два подмножества (части).

Одно подмножество образует вектор независимых величин  $z$ , другое подмножество - вектор зависимых величин  $q$ . Координатами вектора  $z$

являются номиналы независимых источников и аргументы вольт-амперных характеристик нелинейных двухполюсников (табл. 10.16, с. 62):

$$z = (u^N, i^S, e, j)^T \quad (8.1)$$

Координатами вектора  $q$  являются токи и напряжения, дуальные аргументам вольт-амперных характеристик нелинейных двухполюсников, и искомые токи и напряжения (табл. 10.16, с. 62):

$$q = (i^N, u^S, i_k, u_o)^T \quad (8.2)$$

Линейность внутренней части системы позволяет записать связь между векторами  $q$  и  $z$  в виде следующего соотношения, называемого матричным гибридным уравнением системы:

$$q = Hz \quad (8.3)$$

Гибридная матрица системы  $H$  имеет  $(n_x + n_y)$  строк (столько же координат имеет вектор  $q$ ) и  $(n_x + n_y)$  столбцов (столько же координат имеет вектор  $z$ ), где

$n_x$  - количество нелинейных двухполюсников в схеме;

$n_y$  - количество искомых токов и напряжений;

$n_v$  - количество независимых источников.

Элементы гибридной матрицы  $H$  называются первичными параметрами системы с многими сторонами и представляют собой вещественные числа. Их можно выразить через токи и напряжения на сторонах системы следующим образом:



$$h_{ij} = \frac{q_i}{z_j}, \quad \left. \begin{array}{l} z_k = 0; \quad k \neq j; \\ k = 1, 2, \dots, n_x + n_y \end{array} \right\} \quad (8.4)$$

Каждый внешний параметр системы, таким образом, представляет собой по существу некоторую схемную функцию, вид которой определяется типом величин  $q_i$  и  $z_j$ . Например, если  $q_i$  - ток и  $z_j$  - ток, то  $h_{ij}$  - коэффициент передачи тока, определенный при  $z_k=0 \dots$  (см. ф-лу (8.4)). Поэтому внешние параметры можно рассчитать через матрицу проводимости внутренней части системы  $Y_c$  по соответствующим формулам (см. табл. 10.4, с. 53).

Обнуление всех координат вектора  $\mathbf{z}$  кроме  $z_j$  равнозначно замыканию (если  $z_j$  - напряжение) или размыканию (если  $z_j$  - ток) соответствующей стороны системы, как это делалось в системах с многими входами. Поэтому в формулу, выбранную для расчета схемной функции, необходимо внести соответствующие коррективы, учитывающие объединение узлов схемы при замыкании сторон системы. Например, если объединяются (замыкаются) узлы схемы  $a, b$ , то к каждому алгебраическому дополнению и определителю, входящим в формулу, дописывается пара суммирующихся индексов  $(a+b)(a+b)$ .

Внешние параметры системы можно определить не только через схемные функции, но и любым другим методом анализа линейных резистивных схем, задав произвольное значение воздействия  $z_j$ , рассчитав величину реакции  $q_i$  и найдя их отношение.

Определив внешние параметры системы с многими сторонами, можно перейти к решению гибридных уравнений (8.3), записав их в следующей форме:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{v}_{II}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{v}_{II}; \end{aligned} \quad (8.5)$$

где векторы  $\mathbf{x} = (u^N, i^S)^T$ ;  $\mathbf{v}_{II} = (e, j)^T$ ;  $\bar{\mathbf{x}} = (i^N, u^S)^T$ ;  $\mathbf{y} = (i_k, u_o)^T$ ; а матрицы  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ -это соответствующие векторам блоки (подматрицы) матрицы  $\mathbf{H}$ :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}. \quad (8.6)$$

Заменив вектор  $\bar{\mathbf{x}}$  в (8.5) вектор-функцией вольт-амперных характеристик нелинейных двухполюсников  $\mathbf{F}(\mathbf{x})$  (см. табл. 10.16, с. 62), приведем эту систему к совместному виду.

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{v}_{II}. \quad (8.7)$$

Полученная система нелинейных уравнений (8.7) называется гибридной моделью схемы. Ее можно решить относительно вектора  $\mathbf{x}$  каким-либо численным методом.

**Метод простых итераций.** Итерационная формула метода для решения уравнений (8.7) имеет следующий вид:

$$x^{(m+1)} = -F(x^{(m)}) + (A + E) \cdot x^{(m)} + B \cdot v_{\text{И}}; \quad (8.8)$$

где  $E$  - единичная диагональная матрица,  $m$  - итерационный индекс.

**Метод Ньютона-Рафсона.** Итерационная формула применяется в два этапа:

- 1) формируется и решается относительно вектора  $\Delta x^{(m+1)}$  следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$J(x^{(m)}) \cdot \Delta x^{(m+1)} = -F(x^{(m)}) + A \cdot x^{(m)} + B \cdot v_{\text{И}}; \quad (8.9)$$

где матрица Якоби  $J(x^{(m)})$  вычисляется по следующей формуле:

$$J(x^{(m)}) = F'_x(x^{(m)}) - A; \quad (8.10)$$

матрица  $F'_x(x^{(m)})$  - это матрица частных производных вектор-функции  $F(x)$  по координатам вектора  $x$ , рассчитанных при значениях координат вектора  $x$  на  $m$ -й итерации;

- 2) на втором этапе вычисляется вектор очередного  $(m+1)$ -го приближения вектора неизвестных:

$$x^{(m+1)} = x^{(m)} + \Delta x^{(m+1)}. \quad (8.11)$$

Оба этапа повторяются итерация за итерацией, пока не будет достигнута требуемая точность искомого решения. Абсолютную погрешность решения  $\epsilon^{(m+1)}$  на  $(m+1)$ -й итерации можно оценить следующим образом:

$$\epsilon^{(m+1)} = \|x^{(m+1)} - x^{(m)}\|, \quad (8.12)$$

где  $\|\cdot\|$  - некоторая норма вектора.

Невязка  $e^{(m+1)}$  уравнения (8.7) также определяется с использованием нормы вектора по следующей формуле:

$$e^{(m+1)} = \|-F(x^{(m+1)}) + A \cdot x^{(m+1)} + B \cdot v_{\text{И}}\|. \quad (8.13)$$

Вектор искомых величин  $\mathbf{u}$  находится подстановкой найденного вектора  $\mathbf{x}$  в нижнюю систему уравнений (8.5), которая называется системой выходных уравнений.

Гибридную модель и выходные уравнения системы с многими сторонами можно получить из расширенной узловой модели схемы [ 5 ]:

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Y}} & & \mathbf{A}_i \\ -\mathbf{A}_u^T & \mathbf{1} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}} \\ \mathbf{u} \\ \mathbf{i} \end{bmatrix} = \mathbf{0}.$$

Учет сторон системы в расширенной узловой модели производится так, как показано в табл. 10.17, с. 63. Этот подход применяется при разработке соответствующих компьютерных программ.

### Задачи и упражнения

8.1. Рассчитать координаты рабочих точек нелинейных сопротивлений рис. 8.2, если их вольт-амперные характеристики описываются следующими функциями:

$i_{H1} = e^{u_{H1}} - 1$ ;  $u_{H2} = 3 \cdot i_{H2}^3 + i_{H2}$ . Погрешность расчета - не более 5% 8.2. Определить напряжение на нелинейном сопротивлении  $R_H$  рис. 8.3, используя а) гибридную модель; б) параметры эквивалентного источника напряжения. Вольт-амперная характеристика нелинейного сопротивления описывается следующим соотношением:  $i_H = u_H e^{u_H}$ . Допустимая погрешность решения нелинейных уравнений 1 % .

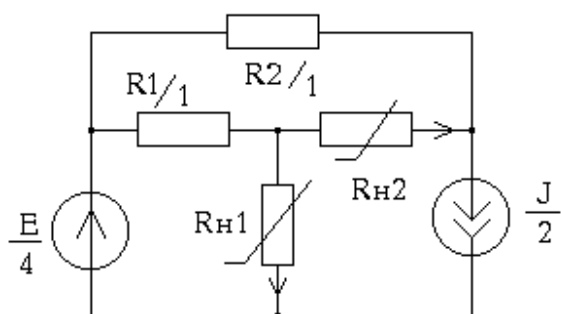


Рис. 8.2

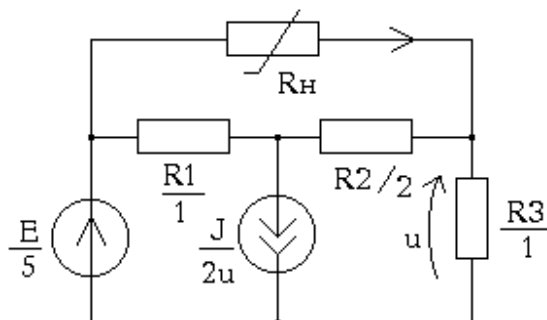


Рис. 8.3

8.3. Вольт-амперная характеристика стабилитрона рис. 8.4 задается выражением  $i = 10^{-3}(e^u - e^{-u^3})$ , а нелинейного сопротивления - зависимостью  $u_H = i_H^3$ . Определить мощность на сопротивлении  $R2$ , если  $g_3$  - параметры транзистора в рабочей точке имеют следующие значения:  $g_{113} = 2 \cdot 10^{-3}$  См;  $g_{123} = -2 \cdot 10^{-4}$  См;  $g_{213} = 0.2$  См;  $g_{223} = 2 \cdot 10^{-4}$  См.

8.4. Определить напряжение  $u_{\text{вых}}$  рис. 8.5 методом простых итераций, выполнив пять итераций с нулевого начального приближения вектора неизвестных. Оценить относительную погрешность полученного решения. Вольт-амперные характеристики описываются следующими соотношениями:  $i_{H1} = e^{u_{H1}} - 1$ ;  $i_{H2} = u_{H2} \cdot e^{u_{H2}}$ .

8.5. Построить гибридную модель и выходные уравнения схемы рис. 8.6, используя формализованный компьютерный алгоритм. В качестве выходных величин взять напряжения на сопротивлениях  $R2, R4$ .

8.6. Решить задачу 8.5, определив внешние параметры системы через схемные функции.

8.7. Вычислить напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_H$  рис. 8.7, взяв параметры транзистора из задачи 8.3, а уравнения вольт-амперных характеристик - из задачи 8.1.

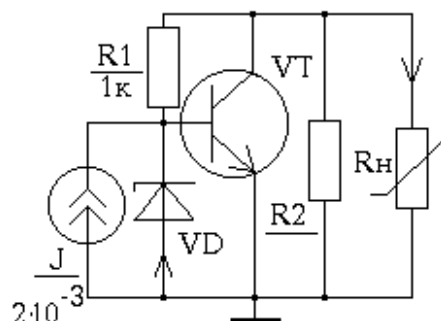


Рис. 8.4

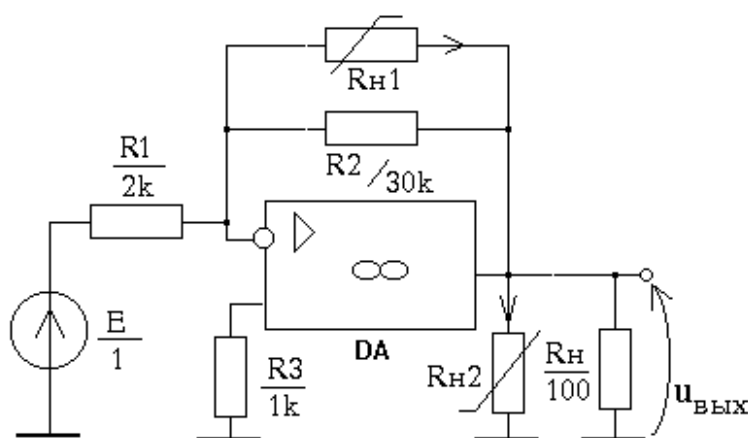
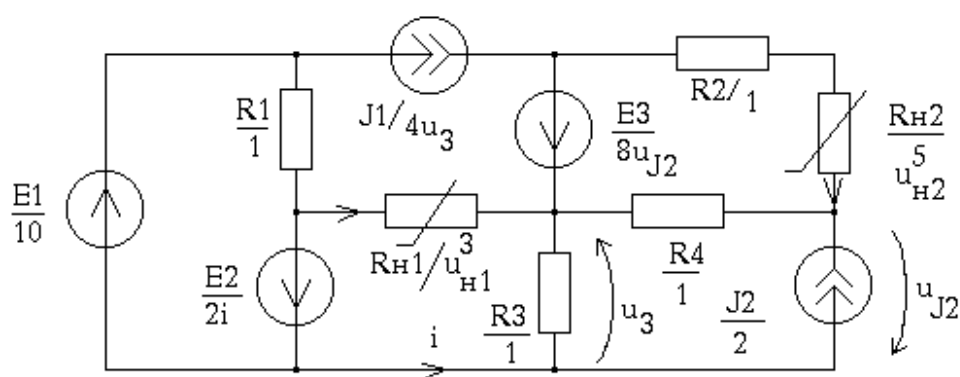


Рис. 8.5



8.6.

Рис.

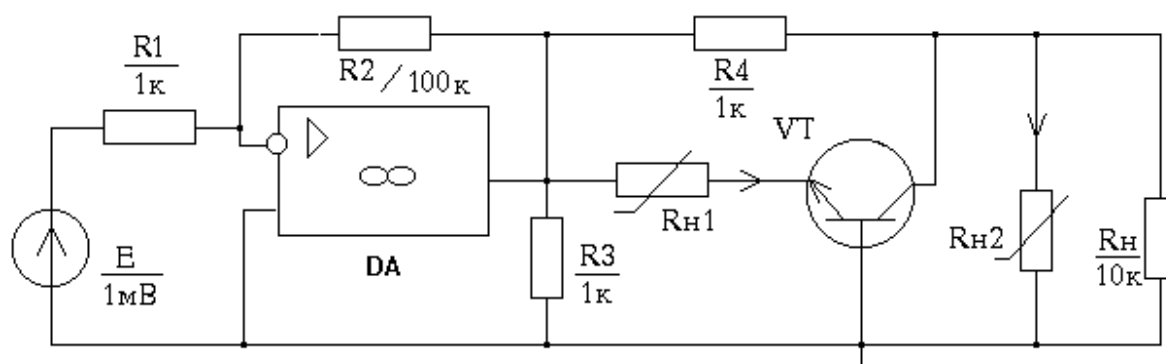


Рис. 8.7

## 9. РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

Расчетно-графическая работа предназначена для приобретения навыков практического применения теоретических положений раздела "Резистивные схемы" теории электронных схем. Она охватывает все темы раздела.

Ее рекомендуется выполнять только после изучения соответствующего теоретического материала.

Расчетно-графическую работу выполняют по графику, который объявляется преподавателем, и *аккуратно* оформляют в ученической тетради. Все рисунки выполняются карандашом под линейку. Расчеты сопровождаются краткими комментариями и выводами по каждому пункту.

На титульном листе указывают название института, факультета, кафедры, на которой проводится обучение по изучаемой дисциплине, номер расчетно-графической работы, номер варианта, фамилию студента, название академической группы, год выполнения работы.

Каждый студент получает свой номер варианта N, который является ключом для выбора анализируемой схемы по соответствующим таблицам.

## Часть 1.

Выбрать анализируемую схему по номеру варианта N:

- взять структурный граф  $N_1$  анализируемой схемы из табл. 9.1. Номер структурного графа  $N_1$  рассчитать по формуле<sup>1</sup>:

$$N_1 = 1 + N(\bmod 6);$$

- каждую дугу структурного графа заменить двухполюсным компонентом<sup>2</sup>, тип которого определяют по строке  $N_2$  таблицы 9.2:

$$N_2 = 1 + N(\bmod 10);$$

- номинал двухполюсного компонента, заданный в системе СИ, определить по строке  $N_3$  таблицы 9.3:

$$N_3 = 1 + N(\bmod 12).$$

В результате получают анализируемую схему, состоящую из пяти сопротивлений, независимого источника тока и независимого источника напряжения.

## Задание

### 1. Выполнить анализ схемы методом эквивалентных преобразований.

1.1. Рассчитать все токи и напряжения, преобразуя исходную схему.

1.2. Проверить баланс мощностей на двухполюсных компонентах.

1.3. Рассчитать все токи и напряжения методом суперпозиции (наложения). Сравнить с п.1.1.

### 2. Проанализировать схему относительно выделенного двухполюсника $R_x$ .<sup>3</sup> 2.1.

Определить значение тока и напряжения на сопротивлении  $R_x$ , представив схему эквивалентным источником тока и напряжения. Сравнить с п. 1.

<sup>1</sup>  $N(\bmod 6)$  (читается N по модулю 6) равно остатку от целочисленного деления числа N на модуль-число 6 в данном случае. Если  $N < 6$ , то  $N(\bmod 6) = N$ . Например:  $9(\bmod 6) = 3$ ;  $4(\bmod 6) = 4$ ;  $13(\bmod 10) = 3$ ;  $10(\bmod 10) = 0$ .

<sup>2</sup> Направление полюсного *тока* двухполюсника должно совпадать с направлением соответствующей дуги структурного графа.

- 2.2. Заменить  $R_x$  согласованной нагрузкой и рассчитать выделяемую в ней мощность.
- 2.3. Определить значение сопротивления  $R_x$ , при котором ток через него уменьшился бы в два раза в сравнении с п. 2.1.

### **3. Выполнить анализ схемы узловым методом.**

- 3.1. Рассчитать токи и напряжения на всех компонентах, используя узловую модель схемы.
- 3.2. Определить параметры эквивалентного источника тока и напряжения, считая  $R_x$  их нагрузкой, через матрично-векторные параметры узловой модели схемы. Сравнить с результатами п. 2.1.
- 3.3. Рассчитать напряжение на сопротивлении  $R_x$ , представив схему как систему с двумя входами. Сравнить с п. 2.1.

### **4. Заменить двухполюсник $R_x$ нелинейным сопротивлением $R_{n1}$ , уравнение вольт-амперной характеристики которого приведено в строке $N_3$ табл. 9.3.**

- 4.1. Определить координаты рабочей точки  $Q$  нелинейного сопротивления  $R_{n1}$  графо-аналитическим методом.
- 4.2. Рассчитать координаты рабочей точки  $Q$  методом Ньютона-Рафсона с погрешностью не более 1%, выбрав, например, нулевое начальное приближение. Сравнить с п. 4.1.
- 4.3. Построить линейную модель нелинейного сопротивления в рабочей точке  $Q$  и вычислить относительную погрешность модели в следующем интервале:  $(0,5u_Q, 1,5u_Q)$  или  $(0,5i_Q, 1,5i_Q)$ .

## **Часть 2.**

Выбрать анализируемый усилитель на транзисторе:

- схему усилителя взять из табл. 9.4. Номер схемы  $N_4$  рассчитывают по формуле:

$$N_4 = 1 + N \pmod{6};$$

- тип биполярного транзистора взять из строки  $N_5$  табл. 9.5. Номер строки определяют по формуле:

$$N_5 = 1 + N \pmod{11}.$$

## **Задание**

### **5. Выполнить анализ усилителя на биполярном транзисторе узловым методом.**

- 5.1. Изобразить входные и выходные характеристики транзистора, выбрать в линейной области рабочую точку  $Q$  и определить ее координаты.
- 5.2. Для выбранной рабочей точки  $Q$  рассчитать сопротивления смещения, округлив полученные значения до величин из ряда сопротивлений E24 [22, с.39]. Напряжение источника  $e$  выбрать из интервала  $(u_Q < e < u_{KЭ, \max})$ .
- 5.3. Определить в выбранной рабочей точке параметры Т-образной линейной схемной модели транзистора с источником тока, управляемым напряжением.
- 5.4. Рассчитать согласованную нагрузку  $R_H$ , используя Т-образную схемную модель из п.5.3.
- 5.5. Рассчитать следующие схемные функции усилителя:  $K_{\underline{u}}$ ,  $K_i$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$ . Результаты свести в таблицу.

### **6. Выполнить анализ усилителя на биполярном транзисторе методом сигнальных графов.**

---

<sup>3</sup> Номер дуги структурного графа, соответствующей выделенному двухполюснику  $R_x$ , указан в таблице 9.2 (строка  $N_2$ , последний столбец).

6.1. Построить нормализованный сигнальный граф усилителя и определить передачи его дуг.

6.2. Определить схемные функции усилителя  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$  по формуле Мэзона и сравнить с результатами п.5.5.

6.3. Определить схемные функции  $K_u$ ,  $K_i$ ,  $R_{вх}$ ,  $R_{вых}$ , используя эквивалентные преобразования нормализованного сигнального графа. Сравнить с результатами п. 6.2.

### **Часть 3.**

В схеме с одним нелинейным сопротивлением  $R_{н1}$  (п. 4) заменить независимый источник тока нелинейным сопротивлением  $R_{н2}$  с вольт-амперной характеристикой  $u_{i2} = 2 \cdot i_{i2} + i_{i2}^3$ . Направление полюсного тока нелинейного сопротивления выбрать таким же, как и направление источника тока.

### **Задание**

#### **7. Сформировать гибридную модель схемы с двумя нелинейными сопротивлениями.**

7.1. Записать в общем виде гибридные уравнения, представив схему как систему с многими сторонами и определив координатный состав векторов независимых и зависимых величин.

7.2. Определить внешние  $h$  - параметры системы через схемные функции.

7.3. Определить внешние  $h$  - параметры системы путем эквивалентных преобразований схемы. Сравнить с п. 7.2.

7.4. Сформировать гибридную модель схемы по компьютерному алгоритму и сравнить с п.п. 7.2, 7.3.

#### **8. Выполнить численный анализ гибридной модели.**

8.1. Рассчитать координаты рабочих точек нелинейных сопротивлений методом Ньютона - Рафсона, выбрав нулевые начальные приближения. Погрешность расчета не должна превышать 1 % .

8.2. Рассчитать токи и напряжения на линейных компонентах схемы, используя результаты п.8.1.

8.3. Произвести кусочно-линейную аппроксимацию вольт-амперных характеристик нелинейных двухполюсников с погрешностью не более 10 % в интервале  $(0; 1,5X^Q)$ , где  $X^Q$  - ток или напряжение в рабочей точке соответствующего нелинейного сопротивления.

8.4. Рассчитать координаты рабочих точек нелинейных двухполюсников кусочно-линейным методом Ньютона - Рафсона, выбрав нулевые начальные приближения. Сравнить с результатами п. 8.1.

Таблица 9.1.  
Структурные графы анализируемой схемы

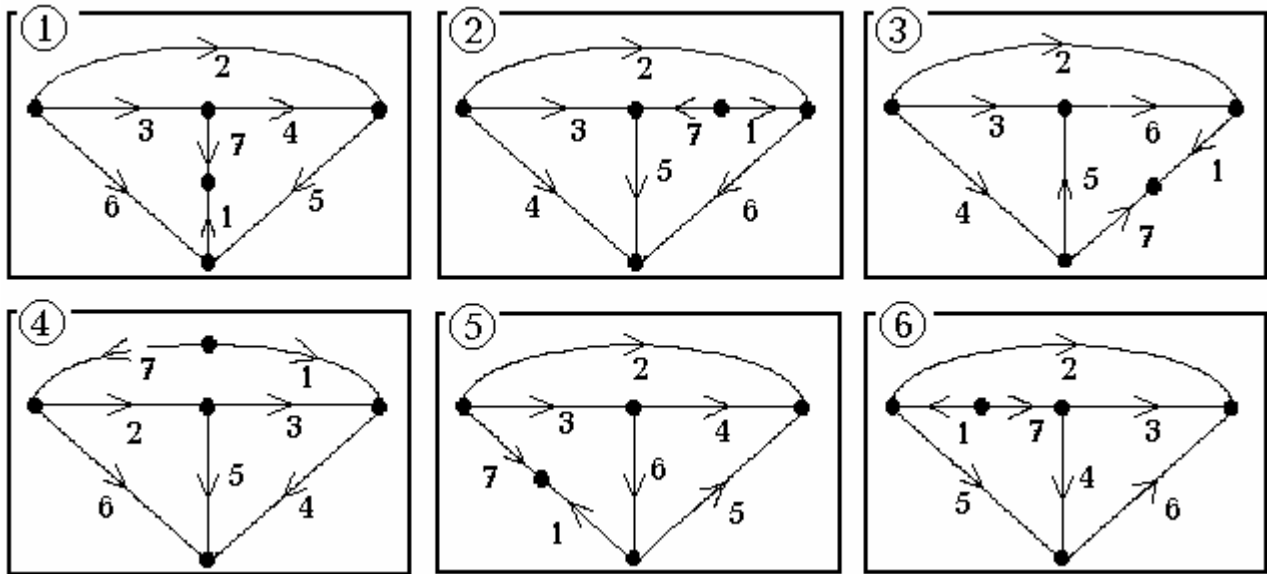


Таблица 9.2  
Соответствие дуг структурного графа компонентам анализируемой схемы

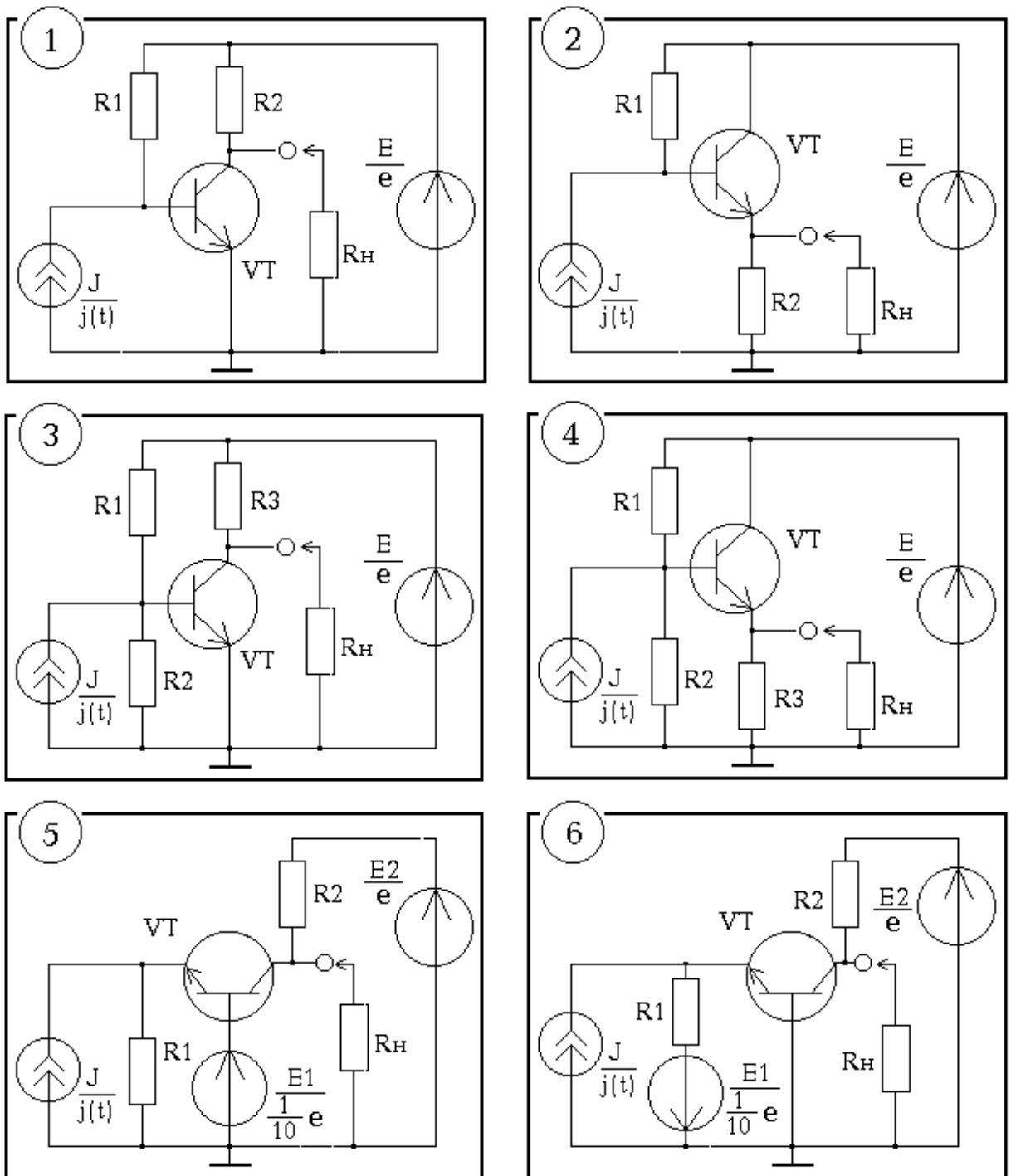
N <sub>2</sub>	R1	R2	R3	R4	R5	J	E	Rx
1	6	5	3	4	1	2	7	3
2	1	2	5	6	4	3	7	4
3	2	3	6	5	1	4	7	5
4	1	2	3	4	6	5	7	6
5	5	4	3	2	1	6	7	2
6	4	5	6	1	3	2	7	3
7	1	2	4	5	6	3	7	4
8	5	6	1	2	3	4	7	5
9	2	3	4	1	6	5	7	6
10	4	5	1	2	3	6	7	2

Таблица 9.3  
Номиналы компонентов анализируемой схемы

N <sub>3</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	i	e	Уравнение ВАХ
1	2	1	2	1	2	2	4	$i_{H1}=e^{u_{H1}}-1$
2	2	2	1	2	1	3	6	$u_{H1}=2\cdot i_{H1}^3$
3	2	1	2	1	2	4	8	$i_{H1}=u_{H1}\cdot e^{u_{H1}}$
4	2	2	1	2	1	2	2	$u_{H1}=e^{i_{H1}}-1$
5	2	1	2	1	2	4	8	$i_{H1}=u_{H1}\cdot e^{u_{H1}}$
6	2	2	1	2	1	3	6	$u_{H1}=2i_{H1}^3+i_{H1}$
7	2	1	2	1	2	1	4	$i_{H1}=2\cdot u_{H1}^3$
8	2	2	1	2	1	4	2	$u_{H1}=i_{H1}^3+2\cdot i_{H1}$
9	2	1	2	1	2	2	8	$i_{H1}=e^{u_{H1}}-1$
10	2	2	1	2	1	2	4	$u_{H1}=3\cdot i_{H1}^3+i_{H1}$
11	2	1	2	1	2	3	6	$i_{H1}=u_{H1}^3+2\cdot u_{H1}$
12	2	2	1	2	1	4	2	$u_{H1}=e^{i_{H1}}-1$



**Таблица 9.4**  
Усилители на биполярном транзисторе



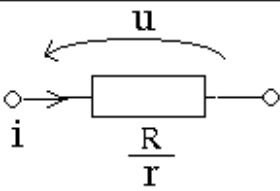
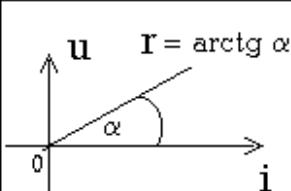
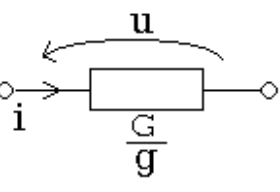
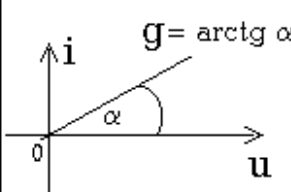
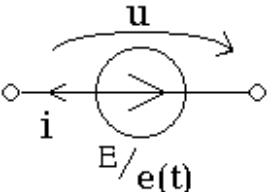
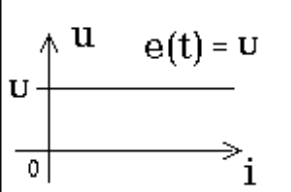
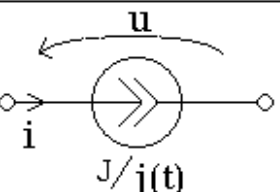
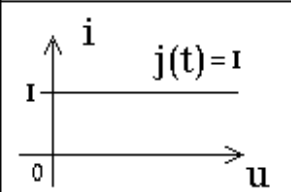
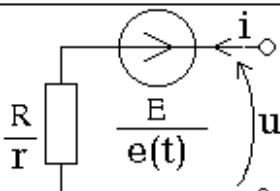
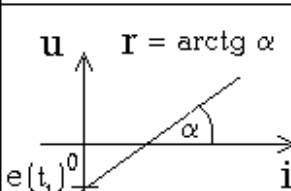
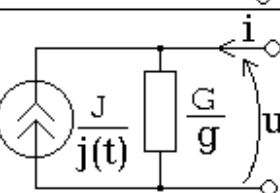
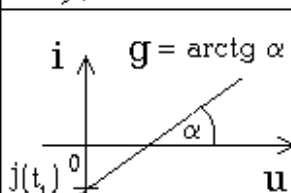
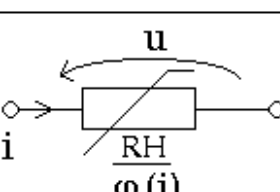
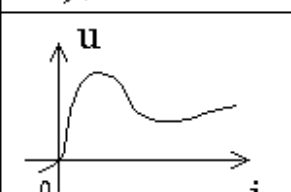
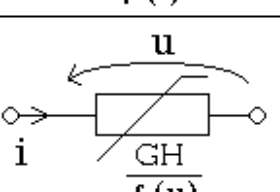
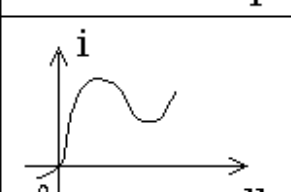
**Таблица 9.5.**  
Тип биполярного транзистора в усилителе

Значение N <sub>5</sub>	Тип транзистора	Значение N <sub>5</sub>	Тип транзистора
1	ГТ330	7	КТ301
2	ГТ329	8	П309
3	КТ601	9	КТ215
4	КТ602	10	ГТ122
5	КТ312	11	МП113
6	КТ307	12	МП111

# 10. СПРАВОЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Таблица 10.1.

Двухполюсники резистивных схем

Название компонента	Схемное обозначение	Компонентное уравнение	Вольт-амперная характеристика
Линейное сопротивление		$u = ri$	
Линейная проводимость		$i = gu$	
Идеальный источник напряжения		$u = e(t)$	
Идеальный источник тока		$i = j(t)$	
Реальный источник напряжения		$u = ri + e(t)$	
Реальный источник тока		$i = gu - j(t)$	
Нелинейное сопротивление		$u = \varphi(i)$	
Нелинейная проводимость		$i = f(u)$	

**Таблица 10.2.**  
Связь между параметрами системы с двумя сторонами

От К	$[y]$	$[z]$	$[h]$	$[f]$	$[a]$	$[b]$
$[y]$	$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{ z } \begin{bmatrix} z_{22} & -z_{12} \\ -z_{21} & z_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -h_{12} \\ h_{21} &  h  \end{bmatrix}$	$\frac{1}{f_{22}} \begin{bmatrix}  f  & f_{12} \\ -f_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{12}} \begin{bmatrix} a_{22} & - a  \\ 1 & -a_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{b_{12}} \begin{bmatrix} -b_{11} & 1 \\ - b  & b_{22} \end{bmatrix}$
$[z]$	$\frac{1}{ y } \begin{bmatrix} y_{22} & -y_{12} \\ -y_{21} & y_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{22}} \begin{bmatrix}  h  & h_{12} \\ -h_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{f_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -f_{12} \\ f_{21} &  f  \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{21}} \begin{bmatrix} a_{11} & - a  \\ 1 & -a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{b_{21}} \begin{bmatrix} -b_{22} & 1 \\ - b  & b_{11} \end{bmatrix}$
$[h]$	$\frac{1}{y_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -y_{12} \\ y_{21} &  y  \end{bmatrix}$	$\frac{1}{z_{22}} \begin{bmatrix}  z  & z_{12} \\ -z_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{ f } \begin{bmatrix} f_{22} & -f_{12} \\ -f_{21} & f_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{22}} \begin{bmatrix} a_{12} &  a  \\ 1 & -a_{21} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{b_{11}} \begin{bmatrix} -b_{12} & 1 \\  b  & b_{21} \end{bmatrix}$
$[f]$	$\frac{1}{y_{22}} \begin{bmatrix}  y  & y_{12} \\ -y_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{z_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -z_{12} \\ z_{21} &  z  \end{bmatrix}$	$\frac{1}{ h } \begin{bmatrix} h_{22} & -h_{12} \\ -h_{21} & h_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{a_{11}} \begin{bmatrix} a_{21} &  a  \\ 1 & -a_{12} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{b_{22}} \begin{bmatrix} -b_{21} & 1 \\  b  & b_{12} \end{bmatrix}$
$[a]$	$\frac{1}{y_{21}} \begin{bmatrix} -y_{22} & 1 \\ - y  & y_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{z_{21}} \begin{bmatrix} z_{11} & - z  \\ 1 & -z_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{21}} \begin{bmatrix} - h  & h_{11} \\ -h_{22} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{f_{21}} \begin{bmatrix} 1 & -f_{22} \\ f_{11} & - f  \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{ b } \begin{bmatrix} b_{22} & -b_{12} \\ -b_{21} & b_{11} \end{bmatrix}$
$[b]$	$\frac{1}{y_{12}} \begin{bmatrix} -y_{11} & 1 \\ - y  & y_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{z_{12}} \begin{bmatrix} z_{22} & - z  \\ 1 & -z_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{12}} \begin{bmatrix} 1 & -h_{11} \\ h_{22} & - h  \end{bmatrix}$	$\frac{1}{f_{12}} \begin{bmatrix} - f  & f_{22} \\ -f_{11} & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{ a } \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$
Ура вне ния	$i_{ax} = y_{11} u_{ax} + y_{12} u_{bax}$ $i_{bax} = y_{21} u_{ax} + y_{22} u_{bax}$	$u_{ax} = z_{11} i_{ax} + z_{12} i_{bax}$ $u_{bax} = z_{21} i_{ax} + z_{22} i_{bax}$	$u_{ax} = h_{11} i_{ax} + h_{12} u_{bax}$ $i_{bax} = h_{21} i_{ax} + h_{22} u_{bax}$	$i_{ax} = f_{11} u_{ax} + f_{12} i_{bax}$ $u_{bax} = f_{21} u_{ax} + f_{22} i_{bax}$	$u_{ax} = a_{11} u_{bax} + a_{12} i_{bax}$ $i_{ax} = a_{21} u_{bax} + a_{22} i_{bax}$	$u_{bax} = b_{11} u_{ax} + b_{12} i_{ax}$ $i_{bax} = b_{21} u_{ax} + b_{22} i_{ax}$

**Таблица 10.3.**  
Связь параметров системы с двумя сторонами с матрицей проводимости  
ее внутренней части  $Y_c$

Параметры системы	Связь с матрицей $Y_c$	Условие обратимости	Условие симметрии
$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}} \begin{bmatrix} \Delta_{\beta\beta} & -\Delta_{\beta\alpha} \\ \Delta_{\alpha\beta} & -\Delta_{\alpha\alpha} \end{bmatrix}$	$Y_{21} = -Y_{12}$	$Y_{11} = -Y_{22}$
$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta_{\alpha\alpha} & -\Delta_{\beta\alpha} \\ \Delta_{\alpha\beta} & -\Delta_{\beta\beta} \end{bmatrix}$	$Z_{21} = -Z_{12}$	$Z_{11} = -Z_{22}$
$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta_{\beta\beta}} \begin{bmatrix} \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta} & \Delta_{\beta\alpha} \\ \Delta_{\alpha\beta} & -\Delta \end{bmatrix}$	$h_{21} = h_{12}$	$ h  = -1$
$\begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta_{\alpha\alpha}} \begin{bmatrix} \Delta & \Delta_{\beta\alpha} \\ \Delta_{\alpha\beta} & -\Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta} \end{bmatrix}$	$f_{21} = f_{12}$	$ f  = -1$
$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta_{\alpha\beta}} \begin{bmatrix} \Delta_{\alpha\alpha} & \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta} \\ \Delta & \Delta_{\beta\beta} \end{bmatrix}$	$ a  = 1$	$a_{11} = a_{22}$
$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\Delta_{\beta\alpha}} \begin{bmatrix} \Delta_{\beta\beta} & -\Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta} \\ -\Delta & \Delta_{\alpha\alpha} \end{bmatrix}$	$ b  = 1$	$b_{11} = b_{22}$

$$|h| = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$$

$$|f| = f_{11}f_{22} - f_{12}f_{21}$$

$$|a| = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}$$

$$|b| = b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}$$

Таблица 10.4.

Определение схемных функций через матрицу проводимости внутренней части системы  $Y_c$



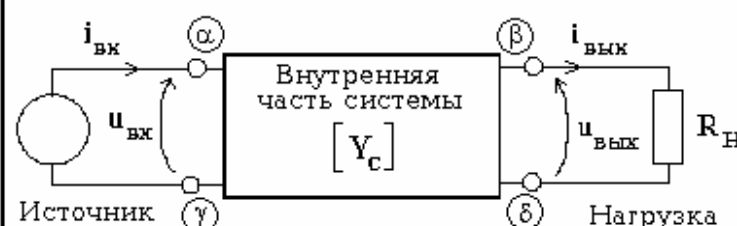
				
Схемная функция	Определение	Формула	Хол. ход $R_n = \infty$	Кор. зам. $R_n = 0$
Передача напряжения	$K_u = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}}$	$\frac{R_n \Delta_{\alpha\beta}}{R_n \Delta_{\alpha\alpha} + \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}$	$\frac{\Delta_{\alpha\beta}}{\Delta_{\alpha\alpha}}$	0
Передача тока	$K_i = \frac{i_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}}$	$\frac{\Delta_{\alpha\beta}}{R_n \Delta_{\alpha\alpha} + \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}$	0	$\frac{\Delta_{\alpha\beta}}{\Delta_{\beta\beta}}$
Сопротивление передачи	$Z_{\text{пер}} = \frac{u_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}}$	$\frac{R_n \Delta_{\alpha\beta}}{R_n \Delta_{\alpha\alpha} + \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}$	$\frac{\Delta_{\alpha\beta}}{\Delta_{\alpha\alpha}}$	0
Проводимость передачи	$Y_{\text{пер}} = \frac{i_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}}$	$\frac{\Delta_{\alpha\beta}}{R_n \Delta_{\alpha\alpha} + \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}$	0	$\frac{\Delta_{\alpha\beta}}{\Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}$
Входное сопротивление	$Z_{\text{вх}} = \frac{u_{\text{вх}}}{i_{\text{вх}}}$	$\frac{R_n \Delta_{\alpha\alpha} + \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}{R_n \Delta_{\alpha\alpha} + \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}$	$\frac{\Delta_{\alpha\alpha}}{\Delta_{\alpha\alpha}}$	$\frac{\Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}{\Delta_{\beta\beta}}$
Выходное сопротивление	$Z_{\text{вых}} = -\frac{u_{\text{вых}}}{i_{\text{вых}}}$	$\frac{R_n \Delta_{\beta\beta} + \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}{R_n \Delta_{\alpha\alpha} + \Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}$	$\frac{\Delta_{\beta\beta}}{\Delta_{\alpha\alpha}}$	$\frac{\Delta_{\alpha\alpha,\beta\beta}}{\Delta_{\alpha\alpha}}$
				
				
Источник входного сигнала		Прогодной четырехполюсник	Нагрузка	
			<p>Формулы для схемных функций проходового четырехполюсника получают из формул для уравновешенного четырехполюсника путем следующей замены индексов:</p> <p><math>\alpha \rightarrow (\alpha + \gamma); \quad \beta \rightarrow (\beta + \delta).</math></p>	

Таблица 10.5.

Связь схемных функций с параметрами системы с двумя сторонами

Схемная функция	Определение	П а р а м е т р ы   с и с т е м ы					
		$[y]$	$[z]$	$[h]$	$[f]$	$[a]$	$[b]$
Коэффициент передачи напряжения	$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$	$\frac{y_{21}}{G_H - y_{22}}$	$\frac{R_H z_{21}}{R_H z_{11} -  z }$	$\frac{h_{21}}{G_H h_{11} -  h }$	$\frac{R_H f_{21}}{R_H - f_{22}}$	$\frac{R_H}{R_H a_{11} + a_{12}}$	$\frac{ b }{b_{22} - G_H b_{21}}$
Коэффициент передачи тока	$K_i = \frac{i_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}}$	$\frac{G_H y_{21}}{G_H y_{11} -  y }$	$\frac{z_{21}}{R_H - z_{22}}$	$\frac{G_H h_{21}}{G_H - h_{22}}$	$\frac{f_{21}}{R_H f_{11} -  f }$	$\frac{1}{R_H a_{21} + a_{22}}$	$\frac{ b }{b_{11} - R_H b_{21}}$
Сопротивление передачи	$Z_{\text{пер}} = \frac{U_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}}}$	$\frac{y_{21}}{G_H y_{11} -  y }$	$\frac{z_{21} R_H}{R_H - z_{22}}$	$\frac{h_{21}}{G_H - h_{22}}$	$\frac{R_H f_{21}}{R_H f_{11} -  f }$	$\frac{R_H}{R_H a_{21} + a_{22}}$	$\frac{R_H  b }{b_{11} - R_H b_{21}}$
Проводимость передачи	$Y_{\text{пер}} = \frac{i_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}$	$\frac{G_H y_{21}}{G_H - y_{22}}$	$\frac{z_{21}}{R_H z_{11} -  z }$	$\frac{G_H h_{21}}{G_H h_{11} -  h }$	$\frac{f_{21}}{R_H - f_{22}}$	$\frac{1}{R_H a_{11} + a_{12}}$	$\frac{G_H  b }{b_{22} - G_H b_{12}}$
Входное сопротивление	$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{i_{\text{вх}}}$	$\frac{G_H - y_{22}}{G_H y_{11} -  y }$	$\frac{R_H z_{11} -  z }{R_H - z_{22}}$	$\frac{G_H h_{11} -  h }{G_H - h_{22}}$	$\frac{R_H - f_{22}}{R_H f_{11} -  f }$	$\frac{R_H a_{11} + a_{12}}{R_H a_{21} + a_{22}}$	$\frac{R_H b_{22} - b_{12}}{b_{11} - R_H b_{21}}$
Выходное сопротивление	$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{i_{\text{вых}}}$	$\frac{G_u + y_{11}}{-G_u y_{22} -  y }$	$\frac{-R_u z_{22} -  z }{R_u + z_{11}}$	$\frac{R_u + h_{11}}{-R_u h_{22} -  h }$	$\frac{-G_u f_{22} -  f }{G_u + f_{11}}$	$\frac{R_u a_{22} + a_{12}}{R_u a_{21} + a_{11}}$	$\frac{R_u b_{11} - b_{12}}{b_{22} - R_u b_{21}}$
Определитель	$ \bullet  =$	$\frac{y_{11} y_{22} - y_{12} y_{21}}{y_{11} y_{22} - y_{12} y_{21}}$	$\frac{z_{11} z_{22} - z_{12} z_{21}}{z_{11} z_{22} - z_{12} z_{21}}$	$\frac{h_{11} h_{22} - h_{12} h_{21}}{h_{11} h_{22} - h_{12} h_{21}}$	$\frac{f_{11} f_{22} - f_{12} f_{21}}{f_{11} f_{22} - f_{12} f_{21}}$	$\frac{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}{a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}}$	$\frac{b_{11} b_{22} - b_{12} b_{21}}{b_{11} b_{22} - b_{12} b_{21}}$

**Таблица 10.6.**  
Связь между матрицами параметров трехполюсника

От К	$\begin{bmatrix} g \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} r \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} g \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{ r } \begin{bmatrix} r_{22} & -r_{12} \\ -r_{21} & r_{11} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -h_{12} \\ h_{21} &  h  \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} r \end{bmatrix}$	$\frac{1}{ g } \begin{bmatrix} g_{22} & -g_{12} \\ -g_{21} & g_{11} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}$	$\frac{1}{h_{22}} \begin{bmatrix}  h  & h_{12} \\ -h_{21} & 1 \end{bmatrix}$
$\begin{bmatrix} h \end{bmatrix}$	$\frac{1}{g_{11}} \begin{bmatrix} 1 & -g_{12} \\ g_{21} &  g  \end{bmatrix}$	$\frac{1}{r_{22}} \begin{bmatrix}  r  & r_{12} \\ -r_{21} & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$
Опре- дели- тель	$ g  = g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}$	$ r  = r_{11}r_{22} - r_{12}r_{21}$	$ h  = h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}$

**Таблица 10.7.**  
Связь между определителями матриц параметров трехполюсника

От К	$\begin{bmatrix} g \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} r \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} h \end{bmatrix}$
$ g $	$ g $	$\frac{1}{ r }$	$\frac{h_{22}}{h_{11}}$
$ r $	$\frac{1}{ g }$	$ r $	$\frac{h_{11}}{h_{22}}$
$ h $	$\frac{g_{22}}{g_{11}}$	$\frac{r_{11}}{r_{22}}$	$ h $

**Таблица 10.8.**  
Схемные модели трехполюсника с двумя зависимыми источниками

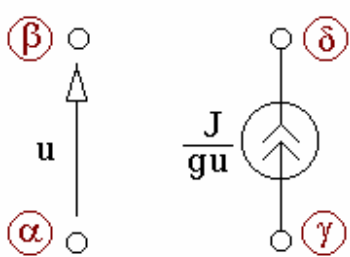
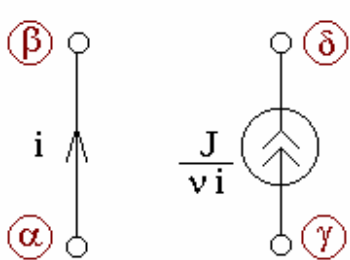
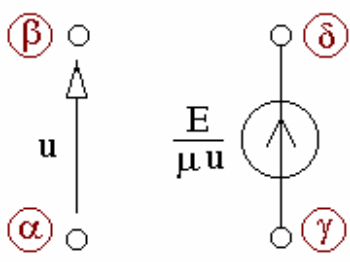
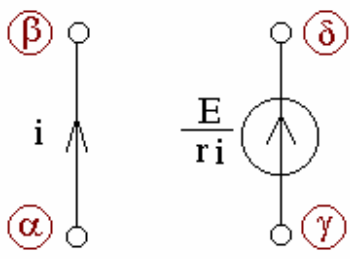
Тип пар.	Компонентное уравнение	Схемная модель	Связь пар-ров с матрицей $Y_T$
$[g]$	$\begin{aligned} i_1 &= g_{11} u_1 + g_{12} u_2 \\ i_2 &= g_{21} u_1 + g_{22} u_2 \end{aligned}$		$\frac{1}{\Delta_{11,22}} \begin{bmatrix} \Delta_{22} & -\Delta_{21} \\ -\Delta_{12} & \Delta_{11} \end{bmatrix}$
$[r]$	$\begin{aligned} u_1 &= r_{11} i_1 + r_{12} i_2 \\ u_2 &= r_{21} i_1 + r_{22} i_2 \end{aligned}$		$\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta_{11} & \Delta_{21} \\ \Delta_{12} & \Delta_{22} \end{bmatrix}$
$[h]$	$\begin{aligned} u_1 &= h_{11} i_1 + h_{12} u_2 \\ i_2 &= h_{21} i_1 + h_{22} u_2 \end{aligned}$		$\frac{1}{\Delta_{22}} \begin{bmatrix} \Delta_{11,22} & \Delta_{21} \\ -\Delta_{12} & \Delta \end{bmatrix}$

**Таблица 10.9.**  
Схемные модели трехполюсника с одним зависимым источником

Тип мод.	Схемная модель	Параметры модели
<b>П</b>		$\begin{bmatrix} G_1 & G_2 \\ G_3 & g_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} + g_{12} & -g_{12} \\ g_{22} + g_{12} & g_{21} - g_{12} \end{bmatrix}$
<b>Т</b>		$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 \\ R_3 & r_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} - r_{12} & r_{12} \\ r_{22} - r_{12} & r_{21} - r_{12} \end{bmatrix}$



**Таблица 10.10.**  
Учет зависимых источников в узловой модели

Тип зависимого источника	Схемное обозначение	Учет в матрице проводимости																														
Источник тока, управляемый напряжением (ИТУН)		<table><tr><th></th><th><math>\alpha</math></th><th><math>\beta</math></th><th><math>\gamma</math></th><th><math>\delta</math></th></tr><tr><th><math>\alpha</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><th><math>\beta</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><th><math>\gamma</math></th><td><math>-g</math></td><td><math>g</math></td><td></td><td></td></tr><tr><th><math>\delta</math></th><td><math>g</math></td><td><math>-g</math></td><td></td><td></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\alpha$					$\beta$					$\gamma$	$-g$	$g$			$\delta$	$g$	$-g$							
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$																												
$\alpha$																																
$\beta$																																
$\gamma$	$-g$	$g$																														
$\delta$	$g$	$-g$																														
Источник тока, управляемый током (ИТУТ)		<table><tr><th></th><th><math>\alpha</math></th><th><math>\beta</math></th><th><math>\gamma</math></th><th><math>\delta</math></th><th>(i)</th></tr><tr><th><math>\alpha</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1</td></tr><tr><th><math>\beta</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td><td>-1</td></tr><tr><th><math>\gamma</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td><td><math>v</math></td></tr><tr><th><math>\delta</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td><td><math>-v</math></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	(i)	$\alpha$					1	$\beta$					-1	$\gamma$					$v$	$\delta$					$-v$
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	(i)																											
$\alpha$					1																											
$\beta$					-1																											
$\gamma$					$v$																											
$\delta$					$-v$																											
Источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН)		<table><tr><th></th><th><math>\alpha</math></th><th><math>\beta</math></th><th><math>\gamma</math></th><th><math>\delta</math></th></tr><tr><th><math>\alpha</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><th><math>\beta</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><th><math>\gamma \delta</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><th></th><td><math>\mu</math></td><td><math>-\mu</math></td><td>-1</td><td>1</td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\alpha$					$\beta$					$\gamma \delta$						$\mu$	$-\mu$	-1	1					
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$																												
$\alpha$																																
$\beta$																																
$\gamma \delta$																																
	$\mu$	$-\mu$	-1	1																												
Источник напряжения, управляемый током (ИНУТ)		<table><tr><th></th><th><math>\alpha</math></th><th><math>\beta</math></th><th><math>\gamma</math></th><th><math>\delta</math></th></tr><tr><th><math>\alpha</math></th><td></td><td></td><td><math>-1/r</math></td><td><math>1/r</math></td></tr><tr><th><math>\beta</math></th><td></td><td></td><td><math>1/r</math></td><td><math>-1/r</math></td></tr><tr><th><math>\gamma \delta</math></th><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\alpha$			$-1/r$	$1/r$	$\beta$			$1/r$	$-1/r$	$\gamma \delta$														
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$																												
$\alpha$			$-1/r$	$1/r$																												
$\beta$			$1/r$	$-1/r$																												
$\gamma \delta$																																

**Таблица 10.11.**  
Учет идеальных многополюсников в узловой модели

Много- полюсник	Схемное обозначение	Входное сопрот.	Схемная модель	Учет в узловой модели																																				
Совер- шенный опера- ционный усилитель		$\infty$		<table><tr><td></td><td><math>\alpha</math></td><td><math>\beta</math></td><td><math>\gamma</math></td><td><math>\delta</math></td></tr><tr><td><math>\alpha</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\beta</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\gamma</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\delta</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\leftarrow \gamma</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td><math>-\mu</math></td><td><math>\mu</math></td><td><math>-1</math></td><td><math>1</math></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\alpha$					$\beta$					$\gamma$					$\delta$					$\leftarrow \gamma$						$-\mu$	$\mu$	$-1$	$1$	
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$																																				
$\alpha$																																								
$\beta$																																								
$\gamma$																																								
$\delta$																																								
$\leftarrow \gamma$																																								
	$-\mu$	$\mu$	$-1$	$1$																																				
Идеаль- ный опера- ционный усилитель		$\infty$		<table><tr><td></td><td><math>\alpha</math></td><td><math>\beta</math></td><td><math>\hat{\alpha}</math></td><td><math>\gamma</math></td><td><math>\delta</math></td></tr><tr><td><math>\alpha</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\beta</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\gamma</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\delta</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\leftarrow \gamma</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\hat{\alpha}$	$\gamma$	$\delta$	$\alpha$						$\beta$						$\gamma$						$\delta$						$\leftarrow \gamma$					
	$\alpha$	$\beta$	$\hat{\alpha}$	$\gamma$	$\delta$																																			
$\alpha$																																								
$\beta$																																								
$\gamma$																																								
$\delta$																																								
$\leftarrow \gamma$																																								
Гиратор		$i_2$ $\frac{1}{G^2} \cdot \frac{1}{R_H}$		<table><tr><td></td><td><math>\alpha</math></td><td><math>\beta</math></td><td><math>\gamma</math></td><td><math>\delta</math></td></tr><tr><td><math>\alpha</math></td><td></td><td><math>G</math></td><td></td><td><math>-G</math></td></tr><tr><td><math>\beta</math></td><td><math>-G</math></td><td></td><td><math>G</math></td><td></td></tr><tr><td><math>\gamma</math></td><td></td><td><math>-G</math></td><td></td><td><math>G</math></td></tr><tr><td><math>\delta</math></td><td><math>G</math></td><td></td><td><math>-G</math></td><td></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$	$\alpha$		$G$		$-G$	$\beta$	$-G$		$G$		$\gamma$		$-G$		$G$	$\delta$	$G$		$-G$												
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$																																				
$\alpha$		$G$		$-G$																																				
$\beta$	$-G$		$G$																																					
$\gamma$		$-G$		$G$																																				
$\delta$	$G$		$-G$																																					
Цирку- лятор (3-хпо- люсный гиратор)		$\frac{1}{G^2} \cdot \frac{1}{R_H}$		<table><tr><td></td><td><math>\alpha</math></td><td><math>\beta</math></td><td><math>\gamma</math></td><td></td></tr><tr><td><math>\alpha</math></td><td></td><td><math>G</math></td><td><math>-G</math></td><td></td></tr><tr><td><math>\beta</math></td><td><math>-G</math></td><td></td><td><math>G</math></td><td></td></tr><tr><td><math>\gamma</math></td><td><math>G</math></td><td><math>-G</math></td><td></td><td></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		$\alpha$		$G$	$-G$		$\beta$	$-G$		$G$		$\gamma$	$G$	$-G$																		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$																																					
$\alpha$		$G$	$-G$																																					
$\beta$	$-G$		$G$																																					
$\gamma$	$G$	$-G$																																						
Конвертор отрица- тельного сопротив- ления с инверсией тока		$i_2$ $-kR_H$		<table><tr><td></td><td><math>\alpha</math></td><td><math>\beta</math></td><td><math>\hat{\beta}</math></td><td><math>\gamma</math></td><td><math>(i_1)</math></td></tr><tr><td><math>\alpha</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td><math>1</math></td></tr><tr><td><math>\beta</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td><math>k</math></td></tr><tr><td><math>\gamma</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td><math>-1-k</math></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\hat{\beta}$	$\gamma$	$(i_1)$	$\alpha$					$1$	$\beta$					$k$	$\gamma$					$-1-k$												
	$\alpha$	$\beta$	$\hat{\beta}$	$\gamma$	$(i_1)$																																			
$\alpha$					$1$																																			
$\beta$					$k$																																			
$\gamma$					$-1-k$																																			
Конвертор отрица- тельного сопротив- ления с инверсией напряже- ния		$-kR_H$		<table><tr><td></td><td><math>\alpha</math></td><td><math>\beta</math></td><td><math>\gamma</math></td><td></td></tr><tr><td><math>\alpha</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\beta</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\gamma</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td><math>\leftarrow \beta</math></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td><math>-1</math></td><td><math>-k</math></td><td><math>k+1</math></td><td></td></tr></table>		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$		$\alpha$					$\beta$					$\gamma$					$\leftarrow \beta$						$-1$	$-k$	$k+1$							
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$																																					
$\alpha$																																								
$\beta$																																								
$\gamma$																																								
$\leftarrow \beta$																																								
	$-1$	$-k$	$k+1$																																					

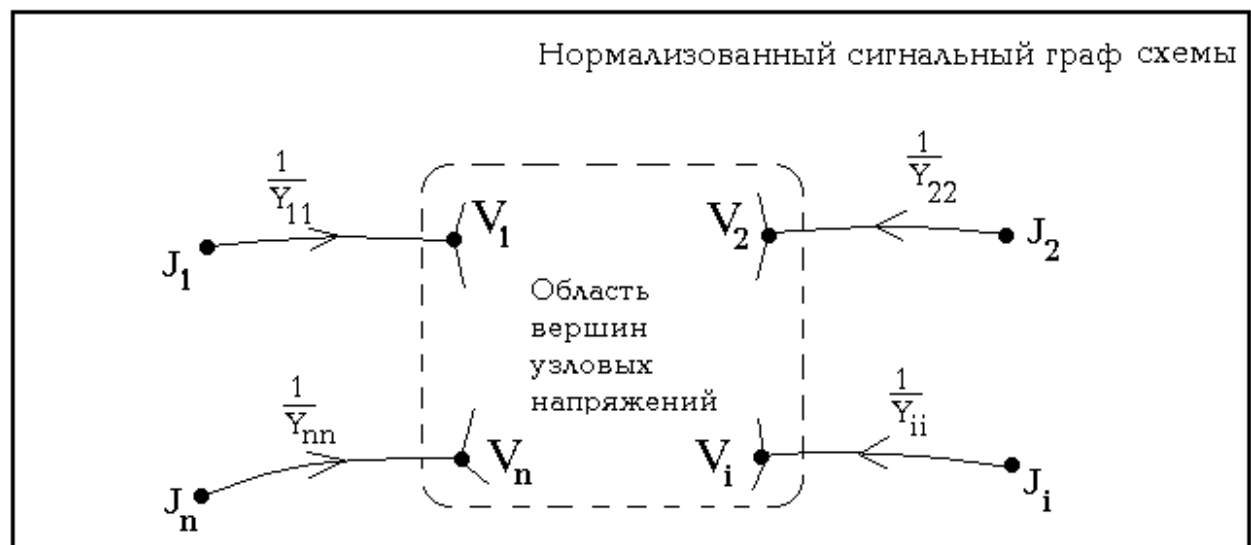
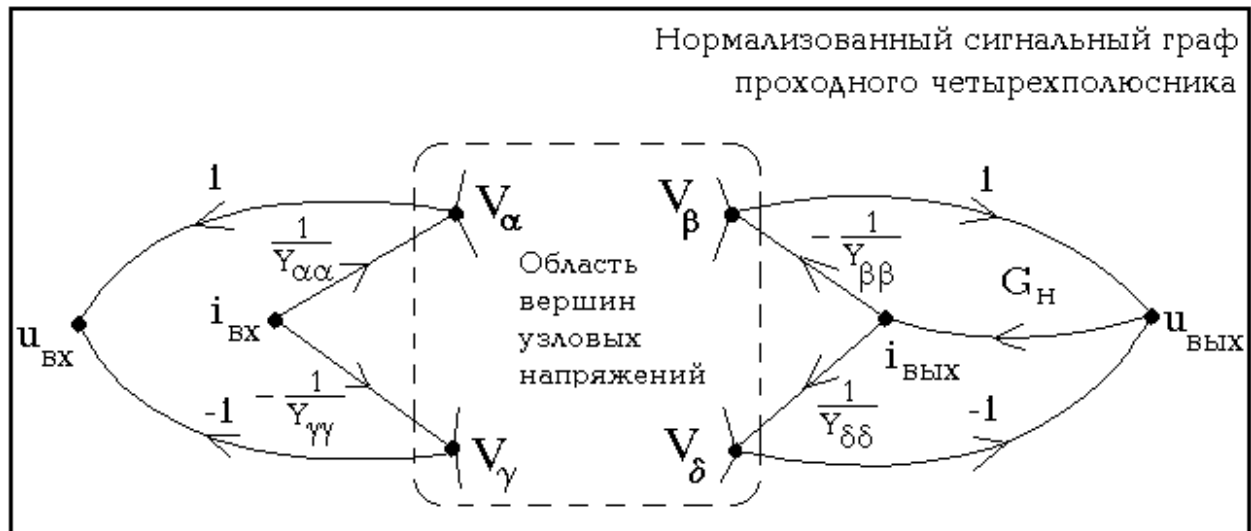
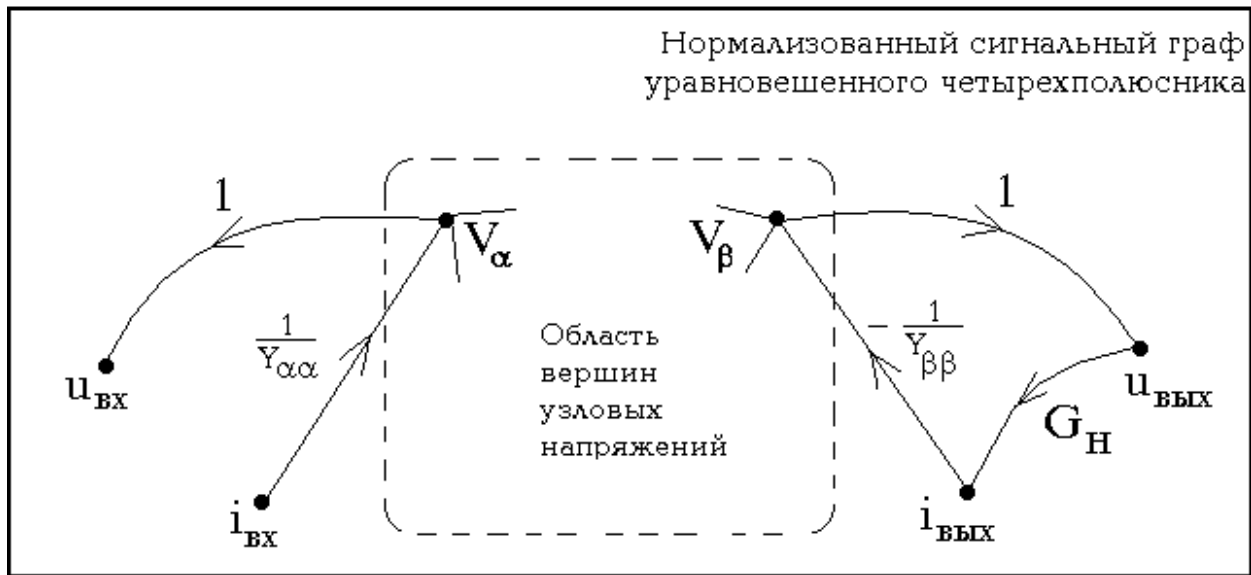
**Таблица 10.12.**  
Учет  $g$ -параметров трехполюсника в матрице проводимости

Обозначение узлов схемы и полюсов	Матричный $g$ - параметр	Полюсное отображение	Запись $g$ -параметров в матрицу проводимости
	$\begin{array}{cc c} & \begin{matrix} 1 & 2 \end{matrix} & \\ \hline \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} & \end{array}$	Полюсы (1 2 3) $\downarrow$ Узлы ( $\alpha \beta \gamma$ )	$\begin{array}{c cc} & \alpha(1) & \beta(2) & \gamma(3) \\ \hline (1) \alpha & g_{11} & g_{12} & -g_{11} - g_{12} \\ (2) \beta & g_{21} & g_{22} & -g_{21} - g_{22} \\ (3) \gamma & -g_{11} & -g_{12} & g_{11} + g_{12} \\ & -g_{21} & -g_{22} & g_{21} + g_{22} \end{array}$

**Таблица 10.13.**  
Наименование и нумерация полюсов транзисторов

Биполярные транзисторы			Полевые транзисторы		
Схемное обозначение	Общий полюс	Матричный $g$ -параметр	Схемное обозначение	Общий полюс	Матричный $g$ -параметр
	Эмиттер	$g_{\varepsilon} = \begin{array}{cc c} & \begin{matrix} Б & К \end{matrix} & \\ \hline \begin{matrix} Б \\ К \end{matrix} & \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} & \end{array}$		Исток	$g_{И} = \begin{array}{cc c} & \begin{matrix} З & С \end{matrix} & \\ \hline \begin{matrix} З \\ С \end{matrix} & \begin{bmatrix} S & G_i \end{bmatrix} & \end{array}$
	База	$g_{Б} = \begin{array}{cc c} & \begin{matrix} Э & К \end{matrix} & \\ \hline \begin{matrix} Э \\ К \end{matrix} & \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} & \end{array}$		Затвор	$g_{З} = \begin{array}{cc c} & \begin{matrix} И & С \end{matrix} & \\ \hline \begin{matrix} И \\ С \end{matrix} & \begin{bmatrix} S & G_i \end{bmatrix} & \end{array}$
	Коллектор	$g_{К} = \begin{array}{cc c} & \begin{matrix} Б & Э \end{matrix} & \\ \hline \begin{matrix} Б \\ Э \end{matrix} & \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{bmatrix} & \end{array}$		Сток	$g_{С} = \begin{array}{cc c} & \begin{matrix} З & И \end{matrix} & \\ \hline \begin{matrix} З \\ И \end{matrix} & \begin{bmatrix} S & G_i \end{bmatrix} & \end{array}$

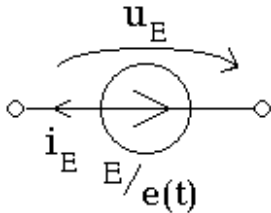
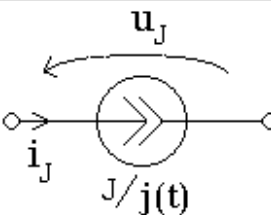
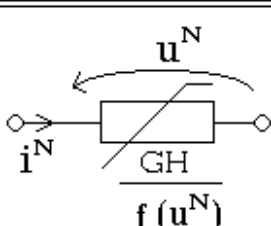
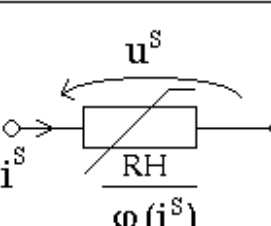
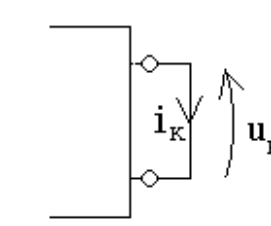
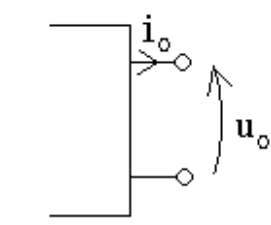
Таблица 10.14.  
Нормализованные сигнальные графы



**Таблица 10.15.**  
Эквивалентные преобразования сигнального графа

Преобразование	Исходный фрагмент	Преобразованный фрагмент
Последовательное соединение дуг		
Параллельное соединение дуг		
Устранение петли		
Исключение вершины		
Исключение вершины с петлей		
Замена источника		

**Таблица 10.16.**  
Зависимые и независимые величины на сторонах системы

Сторона системы	Схемное обозначение	Компонентное уравнение	Величины	
			Зав. $q$	Незав. $z$
Идеальный источник напряжения		$u_E = e(t)$	$i_E$	$u_E$
Идеальный источник тока		$i_J = j(t)$	$u_J$	$i_J$
Нелинейная проводимость		$i^N = f(u^N)$	$i^N$	$u^N$
Нелинейное сопротивление		$u^S = \varphi(i^S)$	$u^S$	$i^S$
Сторона искомого тока		$u_k = 0$	$i_k$	$u_k$
Сторона искомого напряжения		$i_o = 0$	$u_o$	$i_o$

**Таблица 10.17.**  
Учет сторон системы в расширенной узловой модели.

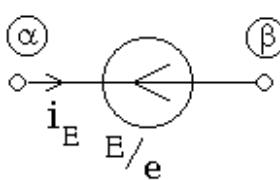
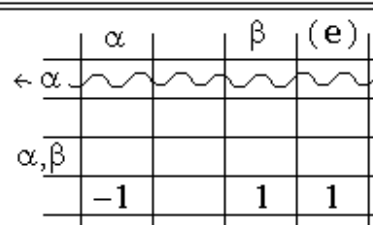
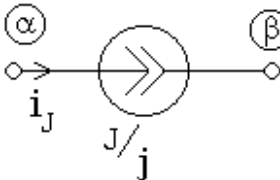
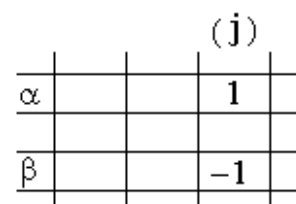
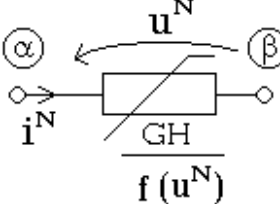
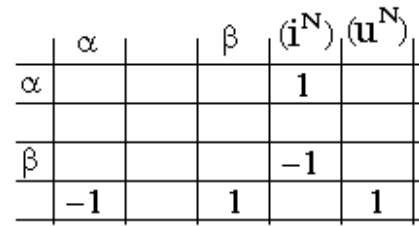
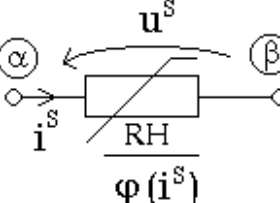
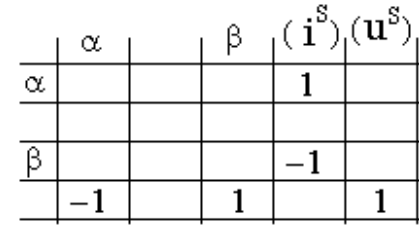
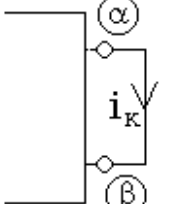
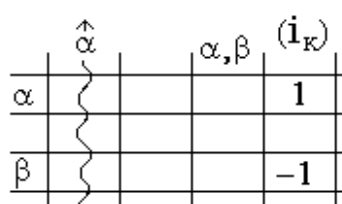
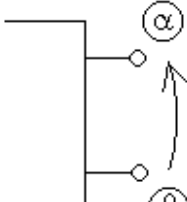
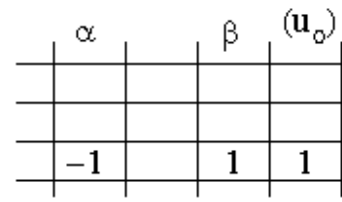
Сторона системы	Подключение стороны	Расширение узловой модели
Идеальный источник напряжения		
Идеальный источник тока		
Нелинейная проводимость		
Нелинейное сопротивление		
Сторона искомого тока		
Сторона искомого напряжения		

Таблица 10.18.

Замена компонентов при переходе от исходной схемы к присоединенной

Компонент исходной схемы	Ком. присоединенной схемы	
		Расчет чувствительности к изменению параметров компонентов
		$R: i_R \hat{i}_R$
		$G: u_G \hat{u}_G$
		$g: u \hat{u}$
		$v: i \hat{u}$
		$\mu: -u \hat{i}$
		$r: -i \hat{i}$



## 11. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основная литература

1. Сигорский В.П., Петренко А.И. Основы теории электронных схем.- Киев: Выща школа, 1971. - 610 с.
2. Сигорский В.П. Моделирование электронных схем. - Киев: КПИ, 1982. -122 с.  
Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи. - М.: Высш. шк., 1981. - 333 с.
3. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи.- М.: Высш.шк., 1977. - 272 с.
4. Сигорский В.П., Витязь О.А., Минаков В.В. Алгоритмы моделирования резистивных цепей. - Киев: УМК ВО, 1988. - 114 с.
5. Данилов Л.В., Матханов П.Н., Мерзлютин Ю.Б. и др. Сборник задач по теории электрических цепей: Учеб. пособие для вузов/ Под ред. Матханова П.Н., Данилова Л.В.- М.: Высшая школа, 1980. - 224с.
6. Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей.- М.: Высшая школа, 1982. - 488с.
7. Бессонов Л.А. Линейные электрические цепи. - М.: Высш. шк., 1983. -336 с.
8. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи. - М.: Высш. шк., 1977. - 344 с.
9. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. - Киев.: Техника, 1977. - 766 с.

### 11. Дополнительная литература

1. Лосев А.К. Теория линейных электрических цепей.- М.: Высшая школа, 1987. - 511с.
2. Попов В.П. Основы теории цепей. - М.: Высшая школа, 1985. - 496 с.
3. Сигорский В.П., Петренко А.И. Алгоритмы анализа электронных схем.- М.: Сов. радио, 1976. - 608 с.
4. Анисимов В.И. Топологический расчет электронных схем. - Ленинград: Энергия, 1977. - 24 с.
5. Норенков И.П., Маничев В.Б. Системы автоматизированного проектирования электронной вычислительной аппаратуры. - М.: Высш. шк., 1983. - 272 с.
6. Сешу С., Рид М.Б. Линейные графы и электрические цепи. - М.: Высш. шк., 1970. - 446 с.
7. Остапенко А.Г. Анализ и синтез линейных радиоэлектронных цепей с помощью графов. - М.: Радио и связь, 1985. - 280 с.
8. Чуа Л.О. Пен-Мин-Лин. Машинный анализ электронных схем. - М.: Энергия. 1980. - 483 с.
9. Картавов С.А. Математические термины.- К.: Вища школа, 1988. - 295с.
10. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: Справочник /Под ред. Б.Л. Перельмана. - М.: Радио и связь, 1981.
11. Трохименко Я.К., Любич Ф.Д. Инженерные расчеты на микрокалькуляторах. - Киев: Техніка, 1980.
12. Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: Справочник радиолюбителя. - К.: Наукова думка, 1981. - 671 с.

## 12. ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ И УПРАЖНЕНИЯМ

### Тема 1.

- 1.3:  $i_1 = -0,545 \text{ A}$ ;  $i_2 = 2,185 \text{ A}$ ;  $i_3 = -1,273 \text{ A}$ ;  $i_4 = -0,180 \text{ A}$ .  
 1.5: а)  $U_m = 10 \text{ В}$ ;  $\omega = 0,314 \text{ рад/с}$ ;  $\varphi = -0,785 \text{ рад}$ ; б)  $U_m = 10 \text{ В}$ ;  $\tau = 13 \text{ с}$ ;  
 $\tau_{II} = 3$ ;  $\tau_3 = 2 \text{ с}$ .  
 1.6:  $d \ll 6 \cdot 10^9 \text{ м}$

### Тема 2.

- 2.1:  $R_{\alpha\gamma} = 14/9 \text{ Ом}$ .  
 2.2:  $R_{\alpha\beta} = 5/8 \text{ Ом}$ ;  $R_{\alpha\gamma} = 1 \text{ Ом}$ ;  $R_{\gamma\beta} = 5/8 \text{ Ом}$ .  
 2.4:  $R_X = 8064 \text{ Ом}$ ;  $e = 8,01 \text{ В}$ .  
 2.5:  $R_X = 7990 \text{ Ом}$ ;  $e = 8 \text{ В}$ .  
 2.6:  $U_V = R_V / (0,101 R_V + 1)$ ;  $R_X = 10^3 R_V / (R_V + 10^3)$ .  
 2.7:  $R_{X,\text{расчетное}} = R_A + R_{X,\text{истинное}}$ .  
 2.8:  $i_{R1} = -0,54 \text{ A}$ ;  $i_{R2} = 2,18 \text{ A}$ ;  $i_{R3} = 1,27 \text{ A}$ ;  $i_{R4} = 1,82 \text{ A}$ ;  $e = -7,89 \text{ В}$  или  $e = 2,29 \text{ В}$ .  
 2.9:  $i_{R4} = 1,82 \text{ A}$ .  
 2.10:  $R_X = 2 \text{ Ом}$ .  
 2.11:  $R_V = 61 \text{ Ом}$ .  
 2.12:  $R_3 = 5,0005 \text{ Ом}$ ;  $e_3 = 10,0005 \text{ В}$ ;  $R_A = 3,33 \text{ Ом}$ .  
 2.13:  $e_2 = 2 \text{ В}$ .  
 2.14:  $R_5 = 5/3 \text{ Ом}$ .

### Тема 3.

- 3.1:
- |        |                   |             |
|--------|-------------------|-------------|
| $G_1$  | $-G_1$            | $0$         |
| $-G_1$ | $G_1 + G_2 + G_3$ | $-G_3$      |
| $0$    | $-G_3$            | $G_3 + G_4$ |
- |       |
|-------|
| $V_1$ |
| $V_2$ |
| $V_3$ |
- $=$
- |             |
|-------------|
| $j_1 - j_2$ |
|             |
| $j_2$       |
- 3.2:  $i_{R1} = 0,95 \text{ A}$ ;  $i_{R2} = 3,09 \text{ A}$ ;  $i_{R3} = 0,36 \text{ A}$ ;  $i_{R4} = 1,28 \text{ A}$ .  
 3.3:  $i_{R1} = 0,42 \text{ A}$ .  
 3.4:  $p_{J1} = -24 \text{ Вт}$ ;  $p_{J2} = -6 \text{ Вт}$ ;  $p_E = -4 \text{ Вт}$ .  
 3.5:  $i_{R1} = -0,975 \text{ A}$ ;  $i_{R2} = -3,804 \text{ A}$ ;  $i_{R3} = -0,457 \text{ A}$ ;  $i_{R4} = -2,392 \text{ A}$ ;  $i_{R5} = -1,415 \text{ A}$ .  
 3.7:  $u = -0,32 \text{ В}$ .  
 3.8:  $R_3 = -2 \text{ Ом}$  (это значение физически нереально).  
 3.9:  $e_2 = 0,83 \text{ В}$ .

### Тема 4.

- 4.1:  $K_u = 0,71$ ;  $Y_{\text{пер}} = 0,18 \text{ См}$ ;  $Y_{\text{вх}} = 0,48 \text{ См}$ .  
 4.2:  $p_{R4} = 0,1 \text{ Вт}$ ;  $p_{\text{max}} = 0,104 \text{ Вт}$ .  
 4.3:  $p_E = -15,38 \text{ Вт}$ ;  $p_J = -2,88 \text{ Вт}$  (оба источника отдают энергию).  
 4.4:  $i_{R1} = 10/3 \text{ A}$ .  
 4.5:  $i_J = 9,85 \text{ A}$ ;  $u_E = 8,86 \text{ В}$ .  
 4.6:  $u_{R6} = 0,56 \text{ В}$ .  
 4.7:  $R_6 = 2,3 \text{ Ом}$ .  
 4.8:  $12$ ;  $-33$ ;  $0$ ;  $6$ ;  $0$ .  
 4.9:  $6$ ;  $0$ ;  $0$ ;  $6$ ;  $-12$ .

**Тема 5.**

- 5.1:  $i_Q=1,411 \text{ A}$ ;  $u_Q=0,706 \text{ В}$ .  
 5.3:  $i_{H1}=0,14 \text{ A}$ ;  $i_{H2}=0,49 \text{ A}$ .  
 5.4:  $i_{д, \max}=1,72 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ ;  $i_{д, \min}=-0,632 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ .  
 5.6:  $Q_1$ :  $i_1=1,52 \text{ A}$ ;  $u_1=3,51 \text{ В}$ ;  
        $Q_2$ :  $i_2=0,44 \text{ A}$ ;  $u_2=0,66 \text{ В}$ ;  
        $Q_3$ :  $i_3=1,10 \text{ A}$ ;  $u_3=0,66 \text{ В}$ .  
 5.7:  $j=-0,3 \text{ A}$ .

**Тема 6.**

- 6.1:  $h_{11}=1 \text{ kОм}$ ;  $h_{12}=0,025$ ;  $h_{21}=100$ ;  $h_{22}=5 \cdot 10^{-4} \text{ См}$ ;  
 6.4:  $u=0,07 \text{ В}$ .  
 6.5:  $K_u=-99,5$ ;  $K_i=-4,32$ ;  $Z_{\text{пер}}=-475,2 \text{ Ом}$ ;  $Y_{\text{пер}}=-0,9 \text{ См}$ ;  $Z_{\text{BX}}=4,8 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{ВЫХ}}=0$ .  
 6.7: необратимый;  $g_m=-0,69 \text{ См}$ ;  $G_1=-1,28 \text{ См}$ ;  $G_2=0,319 \text{ См}$ ;  $G_3=4,847 \text{ См}$ .  
 6.9:  $u_{23}=3,96 \text{ В}$ ;  $u_{23}=1,92 \text{ В}$ .  
 6.10:  $K_u=99,5$ ;  $K_i=82,2$ ;  $Z_{\text{пер}}=9042 \text{ Ом}$ ;  $Y_{\text{пер}}=0,9 \text{ См}$ ;  $Z_{\text{BX}}=91 \text{ Ом}$ ;  $Z_{\text{ВЫХ}}=0$ .

**Тема 7.**

- 7.2:  $u_{R2}=33,3 \text{ В}$ .  
 7.3: а)  $i_H=-39 \text{ mA}$ ; б)  $i_H=0,47 \text{ mA}$ ; в)  $i_H=29 \text{ mA}$ .  
 7.4:  $K_u=-R_2/R_1$ .  
 7.6:  $i_{R2}=2 \text{ mA}$ ;  $\mu=-2,004$ .  
 7.7:  $i_H=1581 \text{ mA}$ .  
 7.8:  $R_{\text{согл.}}=1887 \text{ Ом}$ .  
 7.9: а)  $K_u=-125 \text{ мВ}$ ;  $u_H=-125 \text{ мВ}$ ;  
       б)  $K_u=1225$ ;  $u_H=1,23 \text{ В}$ ;  
       в)  $K_u=0,93$ ;  $u_H=0,93 \text{ мВ}$ .

**Тема 8.**

- 8.1:  $u_{H1}=1,31 \text{ В}$ ;  $i_{H2}=-1,16 \text{ A}$ .  
 8.2:  $u_H=0,65 \text{ В}$ .  
 8.4:  $u_{H1}=4,9988 \cdot 10^{-4} \text{ В}$ ;  $u_{H2}=-5 \cdot 10^{-4} \text{ В}$ .  
 8.5: Матричное гибридное уравнение системы:

$$\begin{bmatrix} i_{H1} \\ i_{H2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ -\frac{4}{3} & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{H1} \\ u_{H2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{26}{3} \\ 0 & -\frac{23}{6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e \\ j \end{bmatrix}.$$

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цепи, схемы, сигналы . . . . .	3
. . . . .	7
2. Линейные резистивные схемы . . . . .	12
. . . . .	17
3. Узловой метод. . . . .	24
. . . . .	29
4. Системы с двумя сторонами . . . . .	35
. . . . .	40
5. Схемы с нелинейным двухполюсником . . . . .	45
. . . . .	50
6. Схемы с многополюсными компонентами . . . . .	65
. . . . .	66
7. Метод сигнальных графов . . . . .	
. . . . .	
8. Гибридный метод . . . . .	
. . . . .	
9. Расчетно-графическая работа №1 . . . . .	
. . . . .	
10. Справочная информация . . . . .	
. . . . .	
11. Список литературы . . . . .	
. . . . .	
12. Ответы к задачам и упражнениям . . . . .	
. . . . .	