

## ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Теория линейных электрических цепей рассматривает все возможные образования схемных решений раздельно друг от друга без учета возможных взаимных связей, например, в условиях их эквивалентности. Однако структурный синтез всё же требует знаний о связях цепей. В противном случае синтез цепей так и останется на уровне игр с параметрами RLC по Фостеру и Кауэру [1, 2, 3].

Кроме изложенного напомним известную лемму: *законы Кирхгофа взаимно преобразуемы: как преобразование цепей ведёт к преобразованию законов, так и преобразование законов ведет к преобразованию цепей*. Такая мысль нечетко выражена в [4], мы её только перефразировали. Этим высказыванием хотелось бы подчеркнуть ещё не раскрытое свойство цепей, касающееся преобразования узлов (первый закон Кирхгофа для токов) в контуры (второй закон Кирхгофа для напряжений) и обратно. Судя по содержанию леммы, такое преобразование кажется вполне естественным. Однако на сегодня имеется единственное действие, схожее в принципе с выдвигаемой здесь задачей: это трансформация цепей по формулам Кеннели при переходе от треугольника к трёхлучевой звезде и обратно. От преобразования контуров и узлов с ветвями больше трёх, похоже, теоретики отказались. Например, в работе [5] доказывается невозможность перехода от многолучевой звезды к многоугольнику и обратно. Нам предстоит показать, что решение задачи всё же есть. Может быть, оно не совсем применимо к преобразованию цепей с целью упрощения, как часто используются звезда и треугольник, но совершенно аналогичное ему.

Прежде чем разобраться по существу с вопросом синтеза различных структур линейных цепей, рассмотрим их взаимную связь в теории линейных цепей постоянного тока, рассматривая сначала простейшие из цепей: например, двухполюсные, а затем все другие.

**Двухполюсные цепи** могут иметь последовательную, параллельную, смешанную и сложную структуры. Возможность создания различных структур зависит от числа  $n$  связываемых элементов (сопротивлений и проводимостей). Если рассмотреть первые три вида цепей, составленных из одних и тех же сопротивлений, то возможны  $(n - 1) \cdot 2$  комбинаций схем без учета допустимых перестановок. При этом две из них будут: последовательная (относимая нами к классу *свободный контур*) и параллельная (аналогично- *свободный узел*). Оба вида цепей отличаются тем, что никакие перестановки сопротивлений в них не приводят к изменению входного сопротивления. Кроме того, передаточные коэффициенты в этих цепях имеют много значений. Например, коэффициент передачи по напряжению в последовательной цепи одновременно является и коэффициентом передачи по мощности и коэффициентом распределения входного сопротивления в соответствии с передаточной характеристикой цепи. Всё это лишь потому, что коэффициент передачи по току равен единице. Аналогично можно говорить о коэффициенте передачи по току в параллельной цепи, так как коэффициент передачи по напряжению равен единице. Смешанные цепи теряют эти свойства. Таким образом, последовательная и параллельная структуры являются граничными из множества возможных образований не только с позиций изложенного, но и по значению входного сопротивления. У параллельных цепочек его значение наименьшее из всех возможных, у последовательных – наибольшее.

Подводя итоги, обнаруживаем, что последовательный и параллельный варианты цепей, несмотря на их схожесть и принципиальные различия имеют явные перспективы на эквивалентные связи. Их входные сопротивления (проводимости) можно представить в виде соотношений:

$$R_{bx1} \cdot R_{bx2} = \sum_{k=1}^n R_{ki} / \sum_{k=1}^n G_{1k} \quad \text{или} \quad G_{bx1} \cdot G_{bx2} = \sum_{k=1}^n G_k / \sum_{i=1}^n R_{ki}, \quad (1)$$

где  $R_k$  и  $G_k$  – сопротивления и проводимости  $k$ -того элемента соответственно последовательной или параллельной цепи;  $k = 1, 2, \dots, n$  – порядковый номер элемента схемы.

Безусловно, иногда интересно будет представлять и левую часть в виде отношения сопротивления и проводимости. Тогда возможно появление ещё двух форм записи. Но это уже не принципиально. Всё зависит от удобства используемой расчетной методики.

Электрические цепи с  $n=2$  имеют только две возможности соединения элементов: последовательно или параллельно. Рассмотрим их. Пусть заданы два сопротивления:  $R_1$  и  $R_2$ . Для них входные сопротивления имеют выражения:

$$R_{bx1} = R_1 + R_2 \quad \text{и} \quad R_{bx2} = \frac{1}{G_1 + G_2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_{bx1}},$$

откуда видно, что кроме общего соотношения в виде (1) произведение сопротивлений можно записать и иначе:

$$R_{bx1} \cdot R_{bx2} = R_1 \cdot R_2. \quad (2)$$

Обратим внимание, что рассматриваемый случай встречается на практике в двух вариантах: при рассмотрении вопроса об эквивалентном режиме нагрузки (переходят от одного генератора к другому, *не эквивалентному*) и при согласовании сопротивлений источника и нагрузки. Не касаясь этих вопросов по существу, подчеркнём только, что знание свойств этих цепочек в деталях не бесполезно. Во-первых, соотношение (2) справедливо, если вновь образовать эти цепочки из только что полученных входных сопротивлений и т. д. Во-вторых, выразим (2) через коэффициенты передачи по напряжению и току. Разделив его на произведение входных сопротивлений, получим:

$$1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_2}{\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{H_1}{T_2}, \quad (3)$$

то есть имеем:

$$H_1 = T_2 \quad \text{и} \quad H_2 = T_1. \quad (4)$$

Второе выражение в (4) получено тоже из (3), если в нём поменять местами сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  в числителе. Иначе говоря, последовательная и параллельная цепочки, образованные из двух одних и тех же сопротивлений, имеют одинаковые передаточные коэффициенты по току и по напряжению при анализе реакций на противоположных сопротивлениях. Это свойство позволяет, например, создавать последовательный и параллельный колебательные контуры из одних и тех же катушек и конденсаторов с одинаковыми передаточными свойствами. В данной работе этот интересный факт из обсуждения опустим – нас интересует здесь другой момент. Рассмотрим случай, когда входные сопротивления цепочек равны:  $R_{bx1} = R_{bx2} = R$ . Тогда (2) перепишем в виде:

$$R^2 = R_1 \cdot r_1 = R_2 \cdot r_2, \quad (5)$$

где  $r_1, r_2$  – сопротивления параллельной цепочки, соответствующие сопротивлениям  $R_1$  и  $R_2$ , используемым в последовательной эквивалентной цепочке.

Соотношение (5) можно получить непосредственно из рассмотрения двух эквивалентных по входу схем, анализируя равенства:

$$H_1 = T_1 \quad \text{и} \quad H_2 = T_2. \quad (6)$$

Таким образом, в последовательных и параллельных эквивалентных цепях с одинаковым числом элементов передаточные коэффициенты по напряжению и току (по мощности) соответственно равны, чем обеспечивается эквивалентность и по входу и по каждому из

соответствующих элементов сравниваемых структур. Выражение (5) следует переписать в более общем виде:

$$R_k \cdot r_k = R^2 \text{ и } G_k \cdot g_k = G^2, \quad (7)$$

или

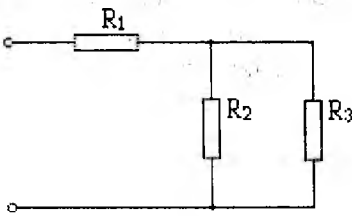
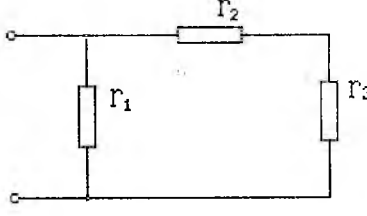
$$\frac{R_k}{g_k} = R^2 \text{ и } \frac{G_k}{r_k} = G^2,$$

где  $R_k, r_k$  –  $k$ -е сопротивление каждой из эквивалентных структур или их проводимости (вторая форма записи).

Закону (7) подчиняются не только последовательные и параллельные структуры, но и все другие двухполюсные схемы, относимые нами к классам обратных по структуре, например, T – и П – образные схемы и прочее.

**Пример 1.** Задана схема (а) (табл. 1) и её параметры:  $R_1 = 3$  Ом, Ом и  $R_3 = 6$  Ом. Следует определить параметры её эквивалентного аналога в виде схемы (б), (там же), сделать проверку по входному сопротивлению и сравнить значения передаточных характеристик, в том числе по мощности, а также определить коэффициенты распределений входного сопротивления (входной проводимости).

Таблица 1

Схема (а)	Схема (б)
	
1. Передаточные характеристики цепей по напряжению и по току	
$1 = H_1 + H_2 = 0,555... + 0,444...$ $H_2 = H_3 = 0,444...$ $1 = T_2 + T_3 = 0,6 + 0,4$	$1 = T_1 + T_2 = 0,555... + 0,444...$ $T_2 = T_3 = 0,444...$ $1 = H_2 + H_3 = 0,6 + 0,4$
2. Передаточные характеристики цепей по мощности	
$1 = M_1 + M_2 + M_3 =$ $= 0,555... + 0,266... + 0,177...$ $M_1 = H_1 = 0,555...$ $M_2 = H_2 \cdot T_2 = 0,266...$ $M_3 = H_3 \cdot T_3 = 0,177...$	$1 = M_1 + M_2 + M_3 =$ $= 0,555... + 0,266... + 0,177...$ $M_1 = T_1 = 0,555...$ $M_2 = T_2 \cdot H_2 = 0,266...$ $M_3 = T_3 \cdot H_3 = 0,177...$
3. Распределительная характеристика цепей по сопротивлению (по проводимости)	
$1 = P_1 + \frac{P_2 \cdot P_3}{P_2 + P_3} =$ $= 0,555... + \frac{0,741 \cdot 1,111}{0,741 + 1,111}$ $P_1 = H_1 = 0,555...$ $P_2 = H_2 / T_2 = 0,741$ $P_3 = H_3 / T_3 = 1,111...$	$1 = \Pi_1 + \frac{\Pi_2 \cdot \Pi_3}{\Pi_2 + \Pi_3} =$ $= 0,555... + \frac{0,741 \cdot 1,111}{0,741 + 1,111}$ $\Pi_1 = T_1 = 0,555...$ $\Pi_2 = T_2 / H_2 = 0,741$ $\Pi_3 = T_3 / H_3 = 1,111...$

Решение. 1. Входное сопротивление схемы (а) и его значение в квадрате:

$$R = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = 3 + \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 5,4 \text{ Ом}; R^2 = 29,16 \text{ Ом}^2.$$

2. Параметры схемы (б):  $r_1 = \frac{R^2}{R_1} = \frac{29,16}{3} = 9,72 \text{ Ом},$

$$r_2 = \frac{R^2}{R_2} = \frac{29,16}{4} = 7,29 \text{ Ом},$$

$$r_3 = \frac{R^2}{R_3} = \frac{29,16}{6} = 4,86 \text{ Ом}.$$

3. Входное сопротивление схемы (б):

$$R = \frac{r_1 \cdot (r_2 + r_3)}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{9,72 \cdot (7,29 + 4,86)}{9,72 + 7,29 + 4,86} = 5,4 \text{ Ом}.$$

4. Сравнение значений коэффициентов передаточных и распределительных характеристик цепей приведены в табл. 1, пункты 1, 2 и 3.

Примечание 1. По поводу использования распределительной характеристики цепей по сопротивлению. Чтобы получить соответствующее сопротивление (проводимость) цепи, нужно умножить её входное сопротивление (входную проводимость) на соответствующий коэффициент распределения сопротивления или проводимости. Разумеется, выражения характеристик п. 3 таблицы могут быть описаны и наоборот: для цепи (а) через коэффициенты распределения проводимости  $\Pi$  и для цепи (б) через коэффициенты распределения сопротивления  $P$ . Мы надеемся, что эта сторона читателю понятна:

$$1 = \frac{\Pi_1 \cdot (\Pi_2 + \Pi_3)}{\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3} \quad \text{и} \quad 1 = \frac{P_1 \cdot (P_2 + P_3)}{P_1 + P_2 + P_3},$$

в этом случае соответствующие коэффициенты примут вид:

$$\Pi_1 = P_1 = 1/0,555 \dots = 1,8; \quad \Pi_2 = P_2 = 1/0,741 = 1,349; \quad \Pi_3 = P_3 = 1/1,111 \dots = 0,9.$$

**Многополюсные структуры цепей.** На рис. 1 (а, б) изображены известные звезда и треугольник. Рассмотрим уравнения Кирхгофа для них, записанные в виде двух колонок под соответствующими рисунками.

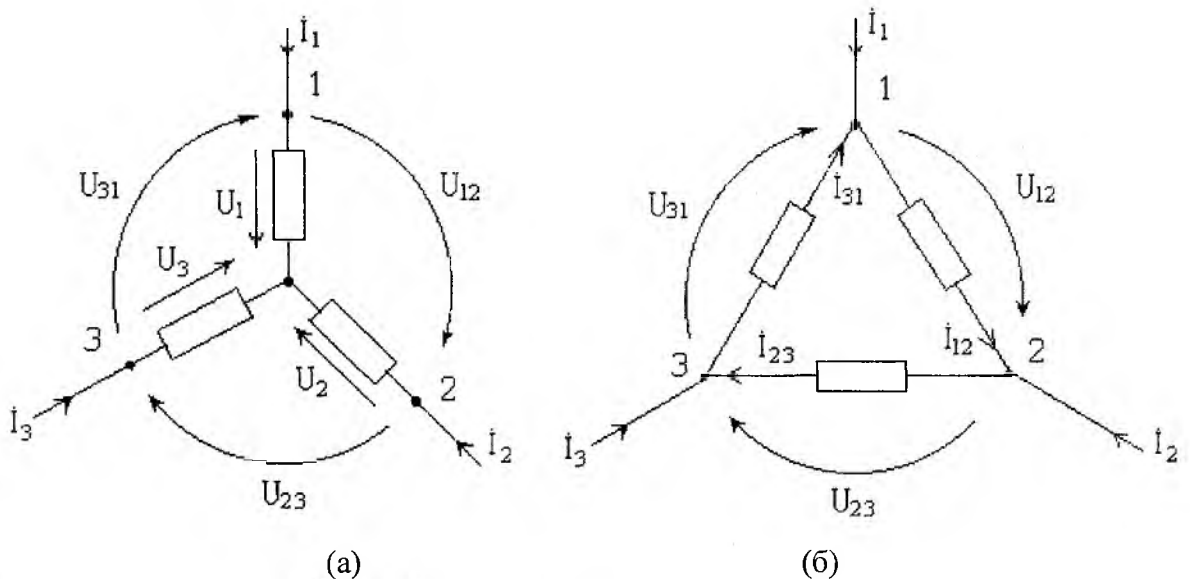


Рис. 1

Звезда	Треугольник	
$I_1 + I_2 + I_3 = 0$	$U_{12} + U_{23} + U_{31} = 0$	(8)
$U_1 - U_2 = U_{12}$	$I_{12} - I_{31} = I_1$	(9)
$U_2 - U_3 = U_{23}$	$I_{23} - I_{12} = I_2$	(10)
$U_3 - U_1 = U_{31}$	$I_{31} - I_{23} = I_3$	(11)

Рассмотрим преобразование звезды в треугольник. С этой целью решим первые три уравнения относительно тока  $I_2$ . Естественно применим закон Ома для напряжений. Перепишем первые три :

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 + I_3 &= 0, \\
 I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 &= I_{12} \cdot R_{12}, \\
 I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 &= I_{23} \cdot R_{23}.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Решение (12) относительно тока  $I_2$  приводим в виде:

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{U_{23} \cdot R_1 - U_{12} \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1} = I_{23} \cdot \frac{R_{23} \cdot R_1}{R^2} - I_{12} \cdot \frac{R_{12} \cdot R_3}{R^2},
 \tag{13}$$

где  $\Delta = R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1 = R^2$  – главный определитель системы уравнений;

$\Delta_2 = U_{23} \cdot R_1 - U_{12} \cdot R_3$  – алгебраическое дополнение определителя  $\Delta$ .

Здесь обратим внимание на величину  $R^2 = \Delta$ , выраженную через условно заданные параметры трёхлучевой звезды. Кстати, это есть отношение суммы проводимостей звезды к их произведению.

Далее, сравнивая (12) с (10) для треугольника, имеем выражения:

$$R_{12} \cdot R_3 = R^2, \quad R_{23} \cdot R_1 = R^2, \quad R_{31} \cdot R_2 = R^2.
 \tag{14}$$

Третье записано по аналогии с двумя первыми и может быть получено при выборе других трёх уравнений. Разумеется, все они могут быть переписаны через проводимости или смешанно, если в этом есть необходимость. Кроме того, соотношения (14) могут быть получены из решения уравнений треугольника совершенно аналогично приёму, описанному выше.

Здесь интерес представляют равенства, полученные по методике (3):

$$H_{12} = T_3, \quad H_{23} = T_1, \quad H_{31} = T_2,
 \tag{15}$$

где  $H_{12}, H_{23}, H_{31}$  – коэффициенты передачи по напряжению для треугольника;

$T_1, T_2, T_3$  – коэффициенты передачи по току для звезды.

Из (14) обнаруживаем сходство с (1) и (7), хотя здесь речь идёт о параметрах совсем другой структуры и с другой формой индексации:

$$\begin{aligned}
 \frac{R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} &= \frac{G_3}{G_1 + G_2 + G_3}, \\
 R_{12} \cdot R_3 = R^2 &= \frac{\sum R_x}{\sum G_y},
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

где  $\sum R_x$  – сумма сопротивлений треугольника;

$\sum G_y$  – сумма проводимостей звезды.

Другими словами, наблюдается абсолютное сходство с выражением (1) в случае последовательных и параллельных эквивалентных цепей.

Итак, уточним термин  $R^2$  для приведенных трехполосных схем. Из описанного выше ясно, что это определитель системы уравнений Кирхгофа, а не квадрат входного сопротивления, как это было в двухполосных цепях. Его определение приводим в трёх вариантах:

$$R^2 = \frac{\sum R_t}{\sum G_y} = \frac{\sum G_y}{\prod G_y} = \frac{\prod R_t}{\sum R_t}, \quad (17)$$

где  $\prod G_y$  и  $\prod R_t$  – соответственно произведения проводимостей звезды и сопротивлений треугольника.

Первая запись удобна для контроля, когда уже известны параметры и звезды и треугольника. Вторая запись применяется, когда заданы параметры звезды, и следует определять параметры треугольника. Однако более удобная форма для использования всё же в виде  $R^2 = R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_3 \cdot R_1$  – для звезды. Третья запись используется при заданных сопротивлениях треугольника, и следует определять параметры звезды. Для треугольника возмож-

на и такая ещё запись:  $\frac{1}{G_{12} \cdot G_{23} + G_{23} \cdot G_{31} + G_{31} \cdot G_{12}} = R^2$ .

Рассмотрим подробнее систему звезда – треугольник. Соединённые вместе соответствующими выводами они обеспечивают возможность для выявления ряда свойств, характерных для эквивалентных многополосных структур. Во-первых, включение ЭДС в любую из шести ветвей системы треугольник-звезда обеспечивает в остальной части схемы режим уравновешенного моста. Если ЭДС была включена в ветвь треугольника, то в перпендикулярной ей ветви звезды ток будет отсутствовать. Если ЭДС включена в ветвь звезды, то тока не будет в перпендикулярной ей ветви треугольника. То есть, система эквивалентных звезды и треугольника представляет собой шесть вариантов уравновешенных мостовых схем.

Во-вторых, корень квадратный из произведения величин  $R^2$ , подсчитанных для любой пары, противоположно расположенных треугольника и звезды внутри системы звезда-треугольник, даёт исходное значение  $R^2$ . Это свойство мы рассмотрим в примере 2 для пятиполосной системы. Всё это говорит об уравновешенности системы звезда-треугольник.

Аналогично могут быть преобразованы другие многоугольники в звёзды и наоборот. Ниже рассмотрено преобразование пятиугольника в пятилучевую звезду.

**Пример 2.** Заданы параметры пятиугольника:  $R_{12} = 20$  Ом,  $R_{23} = 34$  Ом,  $R_{34} = 80$  Ом,  $R_{45} = 28$  Ом,  $R_{51} = 64$  Ом. Определить эквивалентные параметры пятиполосной звезды.

*Решение.* 1. Определитель системы уравнений по законам Кирхгофа (17):

$$R^2 = \frac{1}{G_{12} \cdot G_{23} + G_{23} \cdot G_{34} + G_{34} \cdot G_{45} + G_{45} \cdot G_{51} + G_{51} \cdot G_{12}} = 275,942 \text{ Ом}^2.$$

2. Сопротивления эквивалентной звезды:

$$R_1 = \frac{R^2}{R_{34}} = \frac{275,942}{80} = 3,449 \text{ Ом и т. д. } R_2 = \frac{275,942}{28} = 9,855 \text{ Ом,}$$

$$R_3 = \frac{275,942}{64} = 4,312 \text{ Ом, } R_4 = \frac{275,942}{20} = 13,797 \text{ Ом, } R_5 = \frac{275,942}{34} = 8,116 \text{ Ом.}$$

Контроль: 1) на совместимость параметров:  $R^2 = \frac{\sum R_m}{\sum G_3} = \frac{226}{0,819} = 275,941 \text{ Ом}^2$ ,

2) по передаточным свойствам: например,  $H_{12} = \frac{20}{226} = 0,0885$  и  $T_4 = \frac{0,0725}{0,819} = 0,0885$  и

так далее все соответствующие другие.

3) свойство противоположных звёзд и треугольников в системе звезда-многоугольник:

$$\sqrt{\frac{R_{12} \cdot R_1 \cdot R_2}{R_{12} + R_1 + R_2} \cdot (R_{34} \cdot R_4 + R_4 \cdot R_{45} + R_{45} \cdot R_{34})} = 275,941 \text{ Ом}^2.$$

Здесь также включение источника напряжения в любую из ветвей даёт режим уравновешенного моста при более сложном сочетании сопротивлений в нём. То есть пятиполюсная система звезда-контур содержит 10 различных уравновешенных мостов сложной структуры.

Более сложны для совместного рассмотрения варианты звёзд и многоугольников с четным количеством соединяемых элементов. Однако и там обнаруживаются все три приведенные в примере 2 свойства проверки расчета элементов. С целью сокращения приводимой однотипной информации мы этот случай здесь не рассматриваем.

**Преобразование сложных цепей.** Использование закона преобразования структур в линейных цепях не исчерпывается приведенными здесь вариантами. Ниже рассмотрена схема сложной цепи с двумя источниками ЭДС (рис.2), преобразованная в обратную структуру с двумя источниками тока (рис. 3). Для источников энергии использовано соотношение:

$$\frac{E_{\kappa}}{J_{\kappa}} = \sqrt{\Delta}, \quad (18)$$

которое можно рассматривать как закон преобразования источников энергии в сложных цепях. Это выражение по форме подобно второй форме записи закона эквивалентных структур для пассивных элементов цепей и схоже с известным выражением для двухполюсников:  $\frac{E}{J} = R_{bx} \cdot R_{tx} \equiv \sqrt{R^2}$ , то есть представляет собой как бы расширение известного закона двухполюсных цепей применительно к сложным цепям.

**Пример 3.** Заданы параметры схемы, изображенной на рис. 2:  $E_1 = 20 \text{ В}$ ,  $E_5 = 40 \text{ В}$ ,  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 18 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 3 \text{ Ом}$ .

Определить эквивалентные параметры схемы, изображенной на рис. 3.

*Решение.* 1. Из системы уравнений Кирхгофа найден главный определитель в виде:  $R^2 = \Delta = 6108 \text{ Ом}^2$ .

2. Сопротивления схемы (рис. 3) рассчитаны по выражению  $r_{\kappa} = \frac{R^2}{R_{\kappa}}$ ;  $\kappa=1,2\dots5$  и их значения приведены в таблице 2 её анализа.

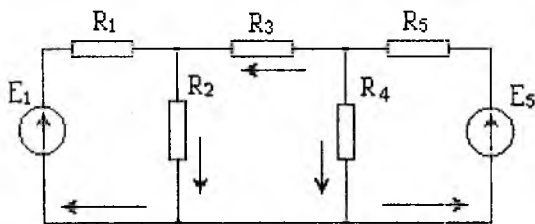


Рис. 2

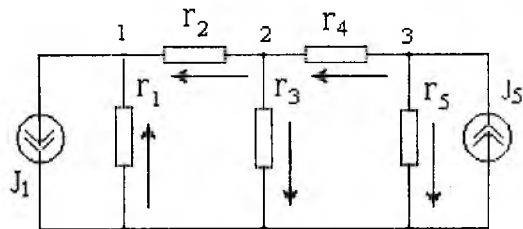


Рис. 3

Таблица 2

№	Расчетные данные (рис. 2)		Результаты анализа схемы (рис. 2)				Расчетные данные (рис. 3)		Результаты анализа схемы (рис. 3)			
	R, Ом	E, В	U, В	I, А	P <sub>г</sub> , Вт	P <sub>е</sub> , Вт	r, Ом	J, А	U, В	I, А	P <sub>г</sub> , Вт	P <sub>г</sub> , Вт
1	2	20	17,9	1,06	2,25	21,2	3054	0,256	-82,9	0,027	2,26	21,2
2	10	-	32,4	1,79	32,04		610,8	-	56,9	0,229	32,03	
3	20	-		0,73	10,66		305,4	-	197,6	0,186	10,56	
4	18	-		1,80	58,77		339,3	-		0,415	58,43	
5	3	40		2,53	19,20	101,2	2036	0,512		0,097	19,16	101,2
Баланс мощности					122,9	122,4	Баланс мощности				122,4	122,4

В таблице приведены узловые напряжения в соответствии с обозначениями на схеме. Обозначения узлов привязаны к номеру таблицы (первая колонка). Токи на схеме соответствуют индексу ветви, определяемому по индексу сопротивления. Эта же система обозначений использована для схемы (рис. 3). Сам анализ не интересен и потому не приводится. Результаты же двух последних колонок каждой из рассматриваемых схем представляют существенный интерес.

Примечание 2. Направления источников тока должны быть согласованы по контуру, так же как ЭДС были согласованы по отношению к узлу 0. В данном случае было достаточно изменить направление любого из двух.

Закон в виде выражений (7) для двухполюсников и сложных схем или (14) для многополюсных схем может быть определён следующим образом: **каждая пара пассивных параметров (сопротивления или проводимости) двух эквивалентных структур из  $n$  элементов связаны между собой так, что их произведение численно равно квадрату входного сопротивления (для двухполюсников) или определителю системы уравнений, составленной по законам Кирхгофа (для сложной цепи).**

Существенная разница между результатами преобразования эквивалентных двухполюсных и сложных цепей по отношению к многополюсным цепям состоит в том, что первые энергетически эквивалентны и по входу и по каждому из элементов в отдельности. Многополюсные цепи энергетически эквивалентны только по входу. И вход характеризуется не входным сопротивлением, а величиной главного определителя системы уравнений Кирхгофа.

### Выводы

1. Установлен закон эквивалентных структур в линейных цепях. Закон позволяет определять связь между активными и пассивными параметрами двух эквивалентных структурно обратных схем.
2. Показано, что передаточные характеристики последовательных и параллельных цепей по напряжению и току одновременно служат передаточными характеристиками по мощности и распределяют входное сопротивление (проводимость) по цепи. В двухполюсниках смешанного типа более эффективными характеристиками являются: характеристика по мощности и по распределению входных сопротивлений или проводимости (см. пример 1).
3. Критериями эквивалентности двух обратных двухполюсных структур с одинаковым числом элементов кроме равенства входных сопротивлений (проводимостей) является равенство соответствующих коэффициентов передачи по напряжению и по току (по мощности). Для сложных цепей – равенство определителей и коэффициентов передачи по мощности.

**Список литературы:** 1. Гиллемин Э. А. Синтез пассивных цепей. М.: Связь, 1970. 720 с. 2. Матханов П. Н. Основы синтеза линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1976. 208 с. 3. Структуры цепей в САПР / В. И. Усынин. К.: Вища шк. Головне вид-во, 1988. 166 с. 4. Попов В. П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 1985. 496 с. 5. Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. 5 изд., перераб. М.: Энергоатомиздат, 1989. 528 с.

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 01.09.2003