

Тема 1.2. Электрическая цепь постоянного тока. Основные законы.

Вопросы:

1. Электрическая цепь и ее основные элементы
2. Пассивные элементы схемы замещения
3. Активные элементы схемы замещения
4. Режимы работы электрической цепи
5. Закон Ома для участка и полной цепи.
6. Законы Кирхгофа
7. Соединения «звезда» и «треугольник»

Электрическая цепь и ее основные элементы

Электротехника – это область науки и техники, изучающая электрические и магнитные явления и их использование в практических целях.

Все электротехнические устройства по назначению, принципу действия и конструктивному оформлению можно разделить на три больших группы:

1. **Источники энергии**, т.е. устройства, вырабатывающие электрический ток (генераторы, термоэлементы, фотоэлементы, химические элементы);
2. **Приемники или нагрузка**, т.е. устройства, потребляющие электрический ток (электродвигатели, электролампы, электромеханизмы и т.д.);
3. **Проводники**, а также различная **коммутационная аппаратура** (выключатели, реле, контакторы и т.д.).

Для работы электрической цепи необходимо наличие источников энергии. В любом источнике за счет сторонних сил неэлектрического происхождения создается электродвижущая сила (ЭДС). На зажимах источника возникает разность потенциалов или напряжение, под воздействием которого во внешней, присоединенной к источнику части цепи возникает электрический ток.

ЭДС (электродвижущая сила) — физическая величина, которая является энергетической характеристикой источника электрической энергии. Она эквивалентна *работе*, совершенной сторонними силами при разделении *зарядов* внутри источника энергии.

$$E = \frac{A_{\text{стор}}}{q}, \text{ В.}$$

Постоянный ток - упорядоченное движения свободных положительных и отрицательных зарядов в проводниках и электролитах под воздействием электрического поля.

Постоянный ток определяется по формуле.

$$i = \frac{dq}{dt},$$

$$I = \frac{[q]}{t}, \text{ А (1 А = Кл/с)}$$

Напряжение на некотором участке цепи равно отношению *работы*, совершённой электрическим полем при перемещении электрического заряда на данном участке цепи, к этому *заряду*.

$$U = A / q, \text{ В}$$

Электрическая цепь – это совокупность устройств, предназначенных для производства, передачи, преобразования и использования электрического тока.

Основные элементы эл. цепи: источники ЭЭ, потребители ЭЭ и соединительные провода.

Вспомогательные элементы: аппаратура управления, защиты, измерительные приборы.

Различают активные и пассивные цепи, участки и элементы цепей. Активными называют электрические цепи, содержащие источники энергии, пассивными – электрические цепи, не содержащие источников энергии.

Электрическую цепь называют линейной, если ни один параметр цепи не зависит от величины или направления тока, или напряжения.

Электрическая цепь является нелинейной, если она содержит хотя бы один нелинейный элемент. Параметры нелинейных элементов зависят от величины или направления тока, или напряжения.

Электрическая схема – это графическое изображение электрической цепи, включающее в себя условные обозначения устройств и показывающее соединение этих устройств. На рисунке 1.1 изображена электрическая схема цепи, состоящей из источника энергии, электроламп 1 и 2, электродвигателя 3.

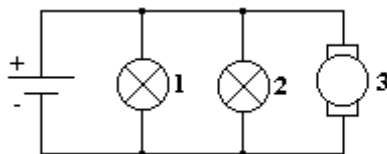


Рис.1.1

Для облегчения анализа электрическую цепь заменяют схемой замещения. Схема замещения – это графическое изображение электрической цепи с помощью идеальных элементов, параметрами которых являются параметры замещаемых элементов.

На рисунке 1.2. показана схема замещения.

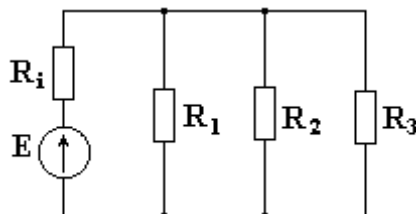


Рис.1.2

Пассивные элементы схемы замещения

Простейшими пассивными элементами схемы замещения являются сопротивление, индуктивность и емкость.

В реальной цепи электрическим сопротивлением обладают не только реостат или резистор, но и проводники, катушки, конденсаторы и т.д. Общим свойством всех устройств, обладающих сопротивлением является необратимое преобразование

электрической энергии в тепловую. Тепловая энергия, выделяемая в сопротивлении, полезно используется или рассеивается в пространстве. В схеме замещения во всех случаях, когда надо учесть необратимое преобразование энергии, включается сопротивление.

Сопротивление проводника определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где l – длина проводника, S – сечение, ρ – удельное сопротивление.

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью.

$$G = \frac{1}{R}.$$

Сопротивление измеряется в Омах [Ом], а проводимость в сименсах [См].

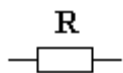
Сопротивление пассивного участка цепи в общем случае определяется по формуле

$$R = \frac{P}{I^2},$$

где P – потребляемая мощность,

I – ток.

Сопротивление в схеме замещения изображается следующим образом



Резистор – это электротехническое устройство, которое обладает электрическим сопротивлением. Применяется для ограничения тока.

Резисторы бывают постоянные, переменные (реостат) и различные специальные – терморезисторы, фоторезисторы, тензорезисторы, нелинейные резисторы, которые меняют своё сопротивление с изменениями различных внешних факторов – температуры, освещённости, механической нагрузки, приложенного напряжения и др.

Переменный резистор, он же регулируемый – называется реостат.

Соединение резисторов разными способами позволяет получить необходимую величину сопротивления и мощности рассеивания одного эквивалентного резистора. Всего существует три способа соединения резисторов – последовательное, параллельное и смешанное.

Последовательное соединение резисторов, когда конец предыдущего элемента соединяется с началом последующего и так далее.

В таком случае общее (эквивалентное) сопротивление рассчитывается как сумма всех сопротивлений, соединённых последовательно:

$$R_{\text{экв}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Параллельное соединение резисторов – когда начала группы резисторов присоединяются к одному узлу, а концы к другому.

В этом случае для расчёта $R_{\text{экв}}$ используется следующее равенство:

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Смешанное соединение резисторов – когда одна часть соединяется последовательно, а другая параллельно. $R_{\text{экв}} = R_{\text{экв посл}} + R_{\text{экв П}}$

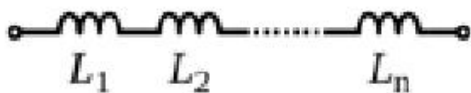
Индуктивностью называется идеальный элемент схемы замещения, характеризующий способность цепи накапливать магнитное поле. Полагают, что индуктивностью обладают только индуктивные катушки. Индуктивностью других элементов электрической цепи пренебрегают.

Индуктивность катушки, измеряемая в генри [Гн], определяется по формуле

$$L = \frac{W \cdot \Phi}{i},$$

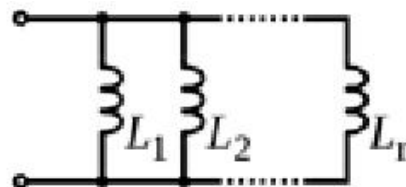
где W – число витков катушки;

Φ – магнитный поток катушки, возбуждаемый током i .



Последовательное соединение катушек индуктивности

$$L_{\text{общ}} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$



Параллельное соединение катушек индуктивности

$$L_{\text{общ}} = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}}$$

Емкостью называется идеальный элемент схемы замещения, характеризующий способность участка электрической цепи накапливать электрическое поле. Полагают, что емкостью обладают только конденсаторы. Емкостью остальных элементов цепи пренебрегают.

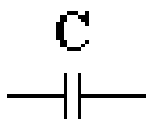
Емкость конденсатора, измеряемая в фарадах [Ф], определяется по формуле

$$C = \frac{q}{U_c},$$

где q – заряд на обкладках конденсатора;

U_c – напряжение на конденсаторе.

На рисунке показано изображение емкости в схеме замещения



Активные элементы схемы замещения

Любой источник энергии можно представить в виде источника ЭДС или источника тока.

Источник ЭДС – это источник, характеризующийся электродвижущей силой и внутренним сопротивлением. Идеальным называется источник ЭДС, внутреннее сопротивление которого равно нулю.

На рисунке изображен источник ЭДС, к зажимам которого подключено сопротивление R .

R_i – внутреннее сопротивление источника ЭДС. Стрелка ЭДС направлена от точки низшего потенциала к точке высшего потенциала, стрелка напряжения на зажимах источника U_{12} направлена в противоположную сторону от точки с большим к точке с меньшим потенциалом.

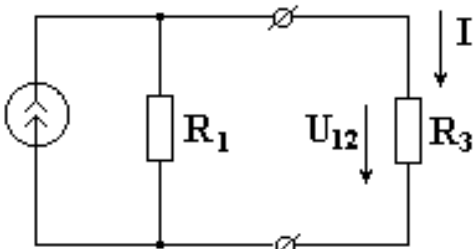
$$E = R_i \cdot I + I \cdot R = R_i \cdot I + U_{12} ,$$

$$U_{12} = E - I \cdot R_i$$

У идеального источника ЭДС внутреннее сопротивление $R_i = 0$, $U_{12} = E$.

Из формулы видно, что напряжение на зажимах реального источника ЭДС уменьшается с увеличением тока. У идеального источника напряжение на зажимах не зависит от тока и равно электродвижущей силе.

Возможен другой путь идеализации источника: представление его в виде источника тока.



Источником тока называется источник энергии, характеризующийся величиной тока и внутренней проводимостью.

Идеальным называется источник тока, внутренняя проводимость которого равна нулю.

$$\frac{E}{R_i} = J \quad \text{- ток источника тока;}$$

$$\frac{1}{R_i} = g_i \quad \text{- внутренняя проводимость.}$$

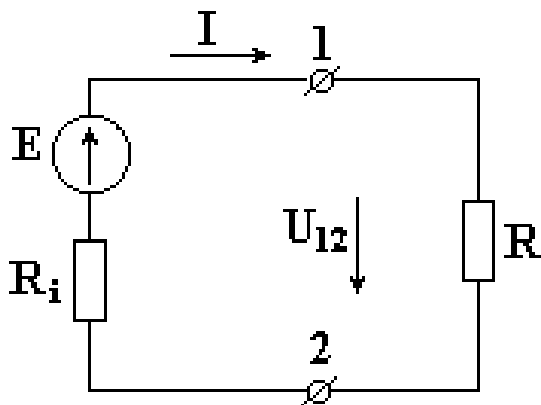
$$J = U_{12} \cdot g_i + I$$

У идеального источника тока $G = 0$ и $J = I$.

Ток идеального источника не зависит от сопротивления внешней части цепи. Он остается постоянным независимо от сопротивления нагрузки.

Условное изображение источника тока показано на рисунке 1.4.

Любой реальный источник ЭДС можно преобразовать в источник тока и наоборот. Источник энергии, внутреннее сопротивление которого мало по сравнению с сопротивлением нагрузки, приближается по своим свойствам к идеальному источнику ЭДС.



Если внутреннее сопротивление источника велико по сравнению с сопротивлением внешней цепи, он приближается по своим свойствам к идеальному источнику тока.

Режимы работы электрических цепей

В зависимости от нагрузки различают следующие режимы работы: номинальный, режим холостого хода, короткого замыкания, согласованный режим.

При **номинальном режиме** электротехнические устройства работают в условиях, указанных в паспортных данных завода изготовителя. В нормальных условиях величины тока, напряжения, мощности не превышают указанных значений.

Режим **холостого хода** возникает при обрыве цепи или отключении сопротивления нагрузки.

Режим **короткого замыкания** получается при сопротивлении нагрузки, равном нулю. Ток короткого замыкания в несколько раз превышает номинальный ток. Режим короткого замыкания является аварийным.

Согласованный режим – это режим передачи от источника к сопротивлению нагрузки наибольшей мощности. Согласованный режим наступает тогда, когда сопротивление нагрузки становится равным внутреннему сопротивлению источника. При этом в нагрузке выделяется максимальная мощность.

Закон Ома для участка и полной цепи

Закон Ома – полученный экспериментальным путём (эмпирический) закон, который устанавливает связь силы тока в проводнике с напряжением на концах проводника и его сопротивлением.

Закон Ома для полной цепи - сила тока в цепи пропорциональна действующей в цепи ЭДС и обратно пропорциональна сумме сопротивлений цепи и внутреннего сопротивления источника.

$$I = \frac{E}{R + r}$$

E — ЭДС источника напряжения, В;

I — сила тока в цепи, А;

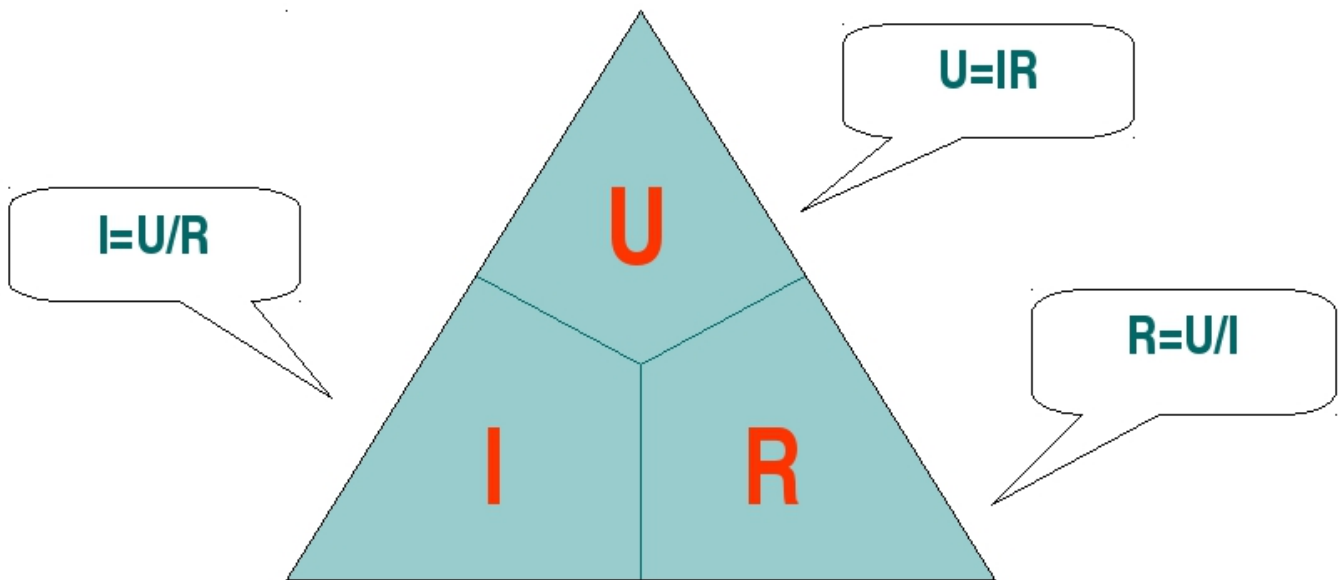
R — сопротивление всех внешних элементов цепи, Ом;

r — внутреннее сопротивление источника напряжения, Ом.

Закон Ома для участка цепи – сила тока I на участке электрической цепи прямо пропорциональна напряжению U на концах участка и обратно пропорциональна его сопротивлению R .

$$I = \frac{U}{R}$$

Для лёгкого запоминания закона Ома используется так называемый «магический треугольник»:



Законы Кирхгофа

Законы Кирхгофа являются одной из форм закона сохранения энергии и потому относятся к фундаментальным законам природы.

Первый закон Кирхгофа является следствием принципа непрерывности электрического тока, в соответствии с которым суммарный поток зарядов через любую замкнутую поверхность равен нулю, т.е. количество зарядов выходящих через эту поверхность должно быть равно количеству входящих зарядов. Основание этого принципа очевидно, т.к. при нарушении его электрические заряды внутри поверхности должны были бы либо исчезать, либо возникать без видимых причин.

Если заряды перемещаются внутри проводников, то они образуют в них электрический ток. Величина электрического тока может измениться только в узле цепи, т.к. связи считаются идеальными проводниками. Поэтому, если окружить узел произвольной поверхностью, то потоки зарядов через эту поверхность будут тождественны токам в проводниках, образующих узел и суммарный ток в узле должен быть равным нулю.

Узел – это участок электрической цепи, содержащий соединения трех или более числа ветвей.

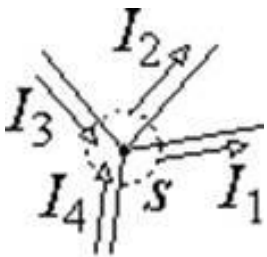


Рис. 1

Для математической записи этого закона нужно принять систему обозначений направлений токов по отношению к рассматриваемому узлу. Можно считать токи направленные к узлу положительными, а от узла отрицательными. Тогда для узла уравнение Кирхгофа будет иметь вид $I_3 + I_4 - I_1 - I_2 = 0$ или $I_3 + I_4 = I_1 + I_2$.

Обобщая сказанное на произвольное число ветвей сходящихся в узле, можно сформулировать **первый закон Кирхгофа** - *алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю.*

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$

В пределах описания одной электрической цепи нельзя для разных узлов использовать разные знаки для токов направленных к узлам или от узлов.

При составлении уравнений по первому закону Кирхгофа направления токов в ветвях электрической цепи выбирают обычно произвольно. При этом необязательно даже стремиться, чтобы во всех узлах цепи присутствовали токи разных направлений. Может получиться так, что в каком-либо узле все токи сходящихся в нем ветвей будут направлены к узлу или от узла, нарушая тем самым принцип непрерывности. В этом случае в процессе определения токов один или несколько из них окажутся отрицательными, что будет свидетельствовать о протекании их в направлении противоположном принятому.

Второй закон Кирхгофа связан с понятием потенциала электрического поля, как работы, совершаемой при перемещении единичного точечного заряда в пространстве. Если такое перемещение совершается по замкнутому контуру, то суммарная работа при возвращении в исходную точку будет равна нулю. В противном случае путем обхода контура можно было бы получать положительную энергию, нарушая закон ее сохранения.

Контур эл. цепи – это замкнутый участок **электрической цепи** (схемы), составленный из одной или нескольких ветвей.

Каждый узел или точка электрической цепи обладает собственным потенциалом и, перемещаясь вдоль замкнутого контура, мы совершаем работу, которая при возврате в исходную точку будет равна нулю. Это свойство потенциального электрического поля и описывает второй закон Кирхгофа в применении к электрической цепи.

Второй закон Кирхгофа –

1) *алгебраическая сумма падений напряжения вдоль любого замкнутого контура электрической цепи равна нулю*

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0$$

Знак «+» выбирается перед падением напряжения на резисторе, если направление протекания тока через него и направление обхода контура совпадают; для падений напряжения на источниках ЭДС знак «+» выбирается, если направление обхода контура и направление действия ЭДС встречны независимо от направления протекания тока;

2) *алгебраическая сумма ЭДС вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме падений напряжения на резисторах в этом контуре*

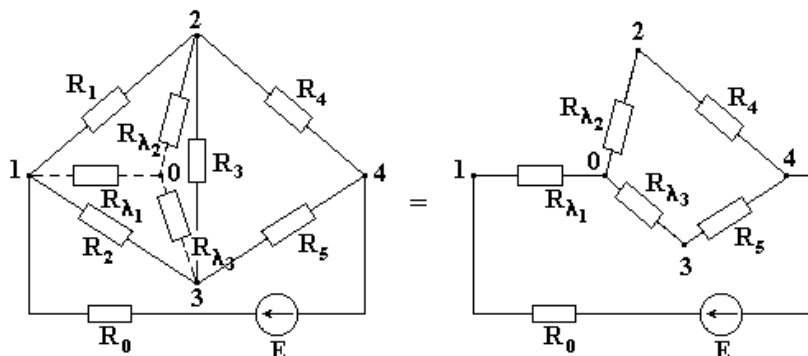
$$\sum_{k=1}^n U_k = \sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{k=1}^m E_k$$

Знак + для ЭДС выбирается в том случае, если направление ее действия совпадает с направлением обхода контура, а для напряжений на резисторах

знак + выбирается, если в них совпадают направление протекания тока и направление обхода.

Соединения «звезда» и «треугольник»

Встречаются схемы, в которых отсутствуют сопротивления, включенные последовательно или параллельно, например – мостовая схема, изображенная на рисунке. Определить эквивалентное сопротивление этой схемы относительно ветви с источником ЭДС описанными выше методами нельзя. Если же заменить треугольник сопротивлений R_1 - R_2 - R_3 включенных между узлами 1-2-3 трехлучевой звездой сопротивлений, лучи которой расходятся из точки 0 в те же узлы 1-2-3, эквивалентное сопротивление полученной схемы легко определяется.



Сопротивление луча эквивалентной звезды сопротивлений равно произведению сопротивлений прилегающих сторон треугольника, деленному на сумму сопротивлений всех сторон треугольника.

В соответствии с указанным правилом сопротивления лучей звезды определяются по формулам:

$$R_{\lambda 1} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3} ; \quad R_{\lambda 2} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} ; \quad R_{\lambda 3} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3} .$$

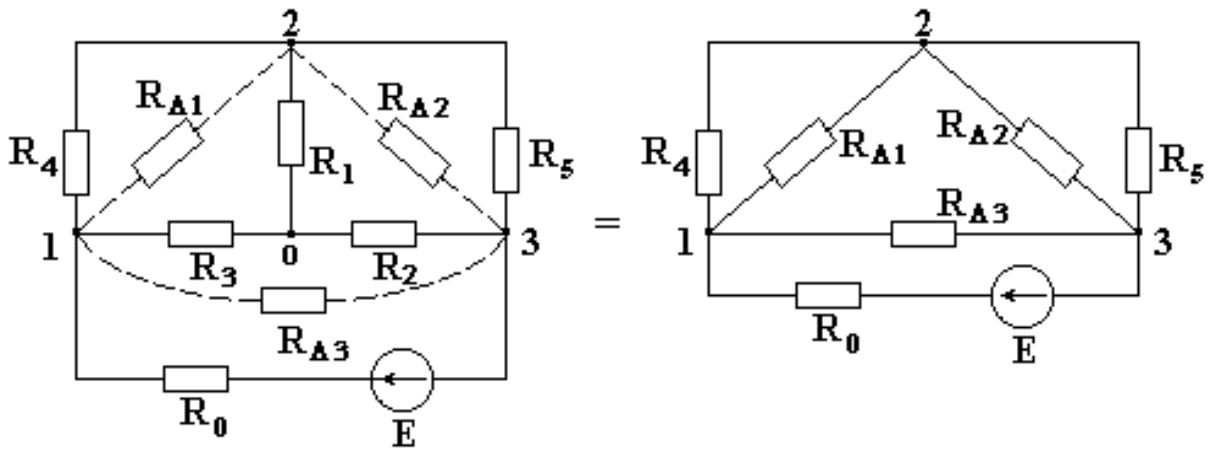
Эквивалентное соединение полученной схемы определяется по формуле

$$R_9 = R_0 + R_{\lambda 1} + \frac{(R_{\lambda 2} + R_4) \cdot (R_{\lambda 3} + R_5)}{R_{\lambda 2} + R_4 + R_{\lambda 3} + R_5} .$$

Иногда для упрощения схемы полезно преобразовать **звезду сопротивлений в эквивалентный треугольник**.

Рассмотрим схему на рисунке 2.5. Заменяем звезду сопротивлений R_1 - R_2 - R_3 эквивалентным треугольником сопротивлений $R_{\Delta 1}$ - $R_{\Delta 2}$ - $R_{\Delta 3}$, включенных между узлами 1-2-3.

Сопротивление стороны эквивалентного треугольника сопротивлений равно сумме сопротивлений двух прилегающих лучей звезды плюс произведение этих же сопротивлений, деленное на сопротивление оставшегося (противолежащего) луча. Сопротивления сторон треугольника определяется по формулам:



$$R_{\Delta 1} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} ; \quad R_{\Delta 2} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3} ;$$

$$R_{\Delta 3} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1} .$$

Эквивалентное сопротивление преобразованной схемы равно

$$R_9 = R_0 + \frac{\left(\frac{R_4 \cdot R_{\Delta 1}}{R_4 + R_{\Delta 1}} + \frac{R_5 \cdot R_{\Delta 2}}{R_5 + R_{\Delta 2}} \right) \cdot R_{\Delta 3}}{\frac{R_4 \cdot R_{\Delta 1}}{R_4 + R_{\Delta 1}} + \frac{R_5 \cdot R_{\Delta 2}}{R_5 + R_{\Delta 2}} + R_{\Delta 3}} .$$