

ЛЕКЦИЯ №1

1. ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКУ

1.1. Ток, напряжение, энергия и мощность в электрической цепи

Электрический ток, как физическое явление, представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов. Под термином "ток" также понимают интенсивность или силу тока, измеряемую количеством электрического заряда q , прошедшее через поперечное сечение проводника в единицу времени: $i = dq / dt$. Следовательно, ток представляет скорость изменения заряда во времени. Ток измеряется в амперах (А). Знак тока зависит от направления движения зарядов одного знака, а именно условно принятого положительного заряда. Выбранное положительное направление тока на схемах обозначается стрелкой.

Прохождение электрического тока в цепи связано с преобразованием или потреблением энергии. Для определения энергии, затрачиваемой на перемещение заряда между двумя рассматриваемыми точками проводника, вводят новую величину - *напряжение*.

Напряжением называют количество энергии, затрачиваемой на перемещение единицы заряда из одной точки в другую: $u = dw / dt$, w - энергия. Напряжение измеряется в вольтах (В).

Напряжение величина относительная и **всегда определяется между двумя точками**. Напряжение между двумя точками на схеме a и b обозначается через U_{ab} . Напряжение U_{ab} – положительное, если точка a имеет более высокий потенциал относительно точки b , и будет отрицательным, если точка a имеет более низкий потенциал, относительно точки b . При этом справедливо соотношение $U_{ab} = -U_{ba}$. Напряжение между двумя точками a и b определяется как разность потенциалов в точках a и b :

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

Потенциал φ – это напряжение в точке относительно общей опорной точки, потенциал, которой условно принимают равным 0. В схемах условным обозначением опорной точки является знак заземления. За опорную точку или узел можно выбрать любую точку схемы, однако на практике, в качестве опорной точки (узла) выбирают точку, к которой подключается наибольшее количество ветвей.

Когда говорят "напряжение в точке", имеют в виду, что напряжение определяется между этой точкой и опорной точкой (землей). Так, если за опорную точку выбран узел b ($\varphi_b = U_b = 0$), то напряжение в точке a равно

$$U_a = U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = U_a - U_b = U_a - 0.$$

Для однозначного определения знака напряжения между двумя выводами рассматриваемого участка цепи одному из выводов условно приписывают положительную полярность, которую отмечают либо стрелкой, направленной от вывода, либо знаками "+", "-". Потенциал вывода со знаком "+", из которого выходит стрелка, выше потенциала второго вывода.

Перед началом анализа схемы должны быть указаны выбранные положительные полярности напряжений - только при этом условии возможно однозначное определение напряжений. Хотя условно положительную полярность напряжения можно выбирать произвольно, обычно удобно выбирать согласованную с выбранным положительным направлением тока, когда стрелки для тока и напряжения совпадают или знак "+" полярности напряжения находится в хвосте стрелки, обозначающей положительное направление тока.

Из определения напряжения можно получить выражение для энергии, затраченной на перемещение заряда q на участке цепи с напряжением U к моменту времени t :

$$w = \int_0^q u dq = \int_{-\infty}^t u idt.$$

Дифференцирование этого равенства по времени дает выражение скорости изменения энергии во времени, т.е. мощности, выражаемой в ваттах:

$$p = \frac{dw}{dt} = ui.$$

Знак мощности определяется знаками напряжения и тока. При совпадении знаков напряжения и тока мощность положительна, что соответствует потреблению энергии в рассматриваемом участке цепи. При несовпадении знаков напряжения и тока мощность отрицательна, что означает отдачу ее из участка цепи (такой участок является источником энергии).

1.2. Элементы электронных схем

Электронные устройства представляют собой соединение различных элементов. Примерами таких элементов служат резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, диоды, транзисторы и многие другие. Все эти элементы характеризуются определенной зависимостью между током и напряжением. Эта зависимость часто может быть представлена вольтамперной характеристикой $u(i)$ (или $i(u)$), т.е. зависимостью напряжения от тока идущего через элемент. Однако в общем случае аргументом напряжения может служить не только ток, но также интеграл от тока по времени, производные по времени и др.

Резисторы. Резисторы представляют собой один из наиболее распространенных элементов электронных схем. Изготавливаются резисторы из проводящего материала (графита, тонкой металлической или графитовой пленки или провода), обладающего не высокой проводимостью.

Напряжение на резисторе прямо пропорционально величине тока (рис.1.1)

$$U = R \cdot I.$$

Коэффициент пропорциональности между напряжением и током представляет собой сопротивление резистора $R = U / I$. Сопротивление R измеряется в Омах. Это формула выражает закон Ома. Резисторы характеризуются также допустимым отклонением величины сопротивления от номинальных величин в процентах, номинальным значением мощности рассеивания, температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), который характеризует изменение сопротивления резистора при изменении температуры и др. Более подробно ознакомиться с резисторами можно в приложении А.

При последовательном соединении резисторов общее сопротивление равно сумме сопротивлений резисторов: $R = R_1 + R_2 + R_3 \dots$

При параллельном соединении резисторов общее сопротивление находится из формулы

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \dots$$

При параллельном соединении резисторов получаем сопротивление меньше сопротивления, причем меньше наименьшего сопротивления из соединенных резисторов.

Мощность, рассеиваемая резистором или любым другим элементом, определяется как $P = U \cdot I$. Используя закон Ома, мощность, рассеиваемую резистором можно записать в виде: $P = I^2 \cdot R$ или $P = U^2 / R$.

Конденсаторы. Конденсаторы, как и резисторы, широко используются в электронных устройствах. В идеальном случае зависимость тока конденсатора от напряжения на нем описывается выражением

$$I = C(dU/dt).$$

Таким образом, ток конденсатора пропорционален не просто напряжению, а скорости изменения напряжения. Коэффициент пропорциональности C – это емкость конденсатора, которая измеряется в фарадах (Ф). Емкость величиной в 1 Ф очень велика, поэтому на практике имеют дело микрофарадами (мкФ), нанофарадами (нФ), пикофарадами (пФ). Емкость C опреде-

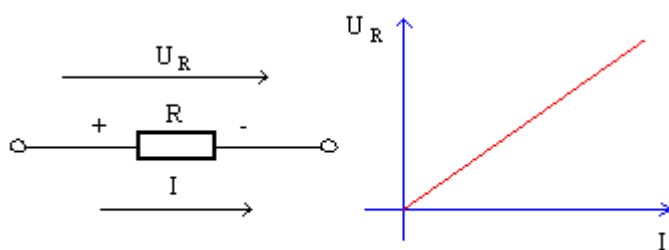


Рис. 1.1

ляет способность конденсатора накапливать заряд. Это видно из следующего свойства конденсатора:

$$Q = C \cdot U.$$

Это означает, что конденсатор, имеющий емкость C фарад, к которому приложено напряжение U вольт, накапливает заряд Q кулон. Очевидно, что чем больше емкость конденсатора, тем больше заряда он может накопить при одном и том же напряжении.

Электрические характеристики конденсаторов зависят от типа диэлектрика между его обкладками. Широкое распространение получили следующие типы конденсаторов:

- керамические, стеклоэмалевые, слюдяные с твердым неорганическим диэлектриком;
- бумажные, металлобумажные, фторопластовые с твердым органическим диэлектриком;
- электролитические, оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлических с оксидным диэлектриком.

Основными параметрами конденсатора являются:

- 1) Номинальное значение емкости.
- 2) Допускаемое отклонение действительной емкости от номинального значения (в %).
- 3) Ток утечки – ток между обкладками конденсатора при постоянном напряжении (в основном для оксидных конденсаторов).
- 4) Сопротивление изоляции или постоянная времени саморазряда.
- 5) Температурный коэффициент емкости ТКЕ, показывающий изменение величины емкости в зависимости от температуры.
- 6) Номинальное напряжение.

Более подробно с характеристиками конденсаторов можно познакомиться в приложении Б.

Емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей, т.е.

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Для последовательного соединения емкостей имеем такое же выражения, что и для параллельного соединения резисторов:

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots$$

Индуктивности. Хорошим приближением индуктивного элемента или просто индуктивности является катушка индуктивности. В идеальном индуктивном элементе напряжение на индуктивности прямо пропорционально скорости изменения тока

$$U = L(dI / dt),$$

где L – коэффициент пропорциональности между напряжением и скоростью изменения тока и называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью. Индуктивность измеряется в генри (Гн). Обратите внимание, что индуктивностью называют элемент и коэффициент самоиндукции.

Индуктивность (элемент) имеет свойства, противоположные свойствам конденсатора. Так постоянное напряжение, приложенное к индуктивности, вызывает нарастание протекающего через него тока, причем изменение тока происходит по линейному закону. Если же пропустить постоянный ток через конденсатор, то это приведет к нарастанию напряжения по линейному закону.

Катушки индуктивности, как правило, имеют цилиндрическую или спиральную форму витков и выполняются как однослойными, так и многослойными. Для увеличения значений индуктивности применяют магнитопроводы. Материалом магнитопровода чаще всего служит железо или феррит. Магнитопровод может быть изготовлен в виде стержня, тора, или броневые сердечники. Изменение индуктивности катушки осуществляется с помощью изменения параметров магнитопровода путем перемещения подвижного сердечника.

Индуктивности главным образом используются в избирательных цепях, фильтрах электрических сигналов. Одна из разновидностей катушек индуктивностей носит название

дросселей. Их основное назначение – обеспечить большое сопротивление для переменных токов и малое для постоянных или низкочастотных токов.

1.3. Динамическое сопротивление

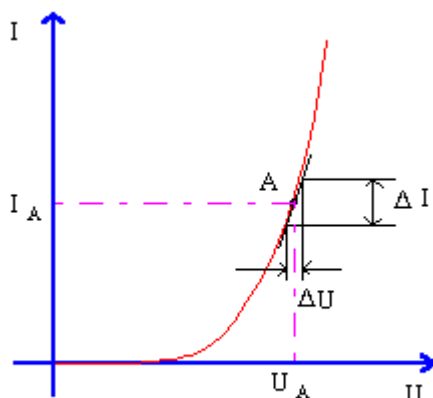


Рис. 1.2

Многие элементы электроники имеют нелинейные вольтамперные характеристики. В этом случае ток не пропорционален напряжению. И здесь нет смысла говорить о сопротивлении, так как отношение U/I не является постоянной величиной, независимой от U , а наоборот зависит от U . Для таких элементов, с нелинейной вольтамперной характеристикой, вводят понятие динамического или дифференциального сопротивления. Пусть нелинейная вольтамперная характеристика задана кривой, показанной на рис. 1.2. Выберем на этой кривой некоторую точку A . Эта точка определяется постоянными значениями напряжения U_A и тока I_A . Проведем касательную к точке A . При малых отклонениях токов и напряжений относительно точки A касательная хорошо аппроксимирует кривую вольтамперной характеристики.

Значит, в окрестности точки A нелинейную кривую вольтамперной характеристики можно заменить линейной характеристикой, т.е. касательной. В качестве переменных здесь рассматриваются изменения (приращения) токов и напряжений относительно точки A . Это равносильно перенесению начала координат в точку A . Тогда для изменений напряжений и токов можно ввести понятие динамического или дифференциального сопротивления как отношение приращения (изменения) напряжения к приращению (изменению) тока

$$r = \Delta U / \Delta I.$$

Динамическое сопротивление еще называют сопротивлением переменному току. Динамическое сопротивление, как и обычное сопротивление, измеряется в Ом.

Особенность динамического сопротивления состоит в том, что оно определяется для приращений напряжений и токов в окрестности некоторой точки вольтамперной характеристики. Эта точка на вольтамперной характеристике определяет режим работы элемента по постоянному току, т.е. постоянные значения напряжения U_A и тока I_A . Динамическое сопротивление зависит от выбранной точки на вольтамперной характеристике, т.к. наклон касательной в каждой точке кривой разный.

Очень часто для построения линейных электронных устройств используются нелинейные элементы (элементы с нелинейной вольтамперной характеристикой). В этом случае нелинейную характеристику в окрестности некоторой точки заменяют линейной – касательной к этой точке. В качестве переменных рассматриваются не полные значения токов и напряжений, а их изменения в окрестности этой точки. Чем меньше отклонения токов и напряжений относительно их постоянных значений, тем лучше касательная приближается к кривой вольтамперной характеристики. Зависимость изменения тока от напряжения в этом случае можно считать линейной и определяется динамическим сопротивлением r :

$$\Delta U = \Delta I \cdot r; \quad \Delta I = \Delta U / r.$$

1.4. Источники тока и напряжения

Под *источником* понимают элемент, питающий цепь электромагнитной энергией. Эта энергия потребляется пассивными элементами цепи – запасается в индуктивностях и емкостях и расходуется в активном сопротивлении. Примерами реальных источников электромагнитной энергии могут служить генераторы постоянных, синусоидальных и импульсных сигналов разнообразной формы, сигналы, получаемые от различных датчиков, антенн ра-

диоприемных устройств, источники питания, сигналы, поступающие с выходов электронных устройств и т.д.

Для анализа цепей удобно вводить идеализированные источники двух видов: источник напряжения и источник тока, которые учитывают главные свойства реальных источников. При соответствующем дополнении идеализированных источников пассивными элементами можно передать все свойства реальных источников по отношению к их внешним выводам.

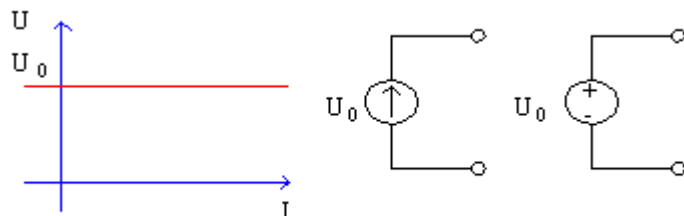


Рис. 1.3. Идеальный источник напряжения

Источником напряжения. Под источником напряжения понимают такой элемент с двумя выводами (полюсами), напряжение между которыми задано в виде некоторой функции времени независимо от тока, отдаваемого во внешнюю цепь. Зависимость напряжения от тока идеального источника напряжения показана на рис.1.3. Такой идеализированный источник способен отдавать неограниченную мощность. Наиболее часто применяемые условные графические изображения источника напряжения показаны на том же рисунке, где принятая положительная полярность напряжения источника указывается либо стрелкой внутри кружочка, либо знаками “+”, “-”.

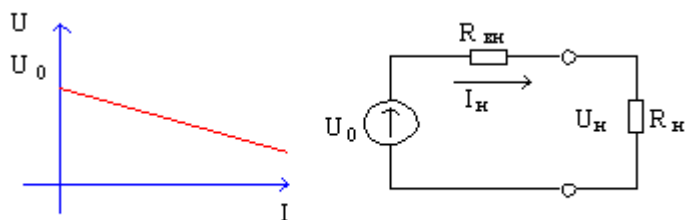


Рис. 1.4. Реальный источник напряжения

Реальные источники сигнала имеют внутренние сопротивления. К источнику напряжения внутреннее сопротивление подключается последовательно. На рис.1.4 показаны вольт-амперная характеристика и схема реального источника напряжения. Для реального источника выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{н}} = U_0 - U_{R_{\text{вн}}} = U_0 - I_{\text{н}} R_{\text{вн}}.$$

Из формулы видно, что выходное напряжение реального источника тока зависит от тока нагрузки $I_{\text{н}}$. Чем больше ток нагрузки, тем больше падает напряжение на внутреннем сопротивлении источника, и меньшая часть напряжения U_0 поступает на нагрузку (на выход). С другой стороны, чем больше внутреннее сопротивление $R_{\text{вн}}$ при неизменном токе нагрузки, тем больше падает на нем напряжения, что ведет к уменьшению напряжения на выходе источника. Применительно к электронным схемам внутреннее сопротивление источника

часто называют *выходным сопротивлением*.

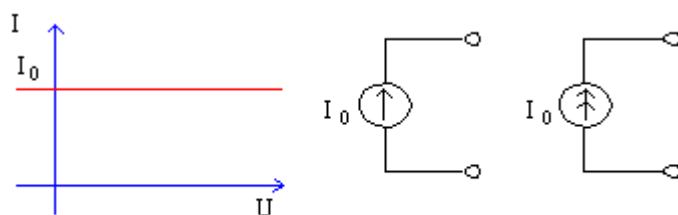


Рис. 1.5. Идеальный источник тока

В случае идеального источника напряжения, его внутреннее сопротивление равно 0 и напряжение на нагрузке не зависит от тока нагрузки. При этом ток нагрузки может возрасти до бесконечности, если сопротивление нагрузки будет стремиться к

0. В действительности невозможно построить идеальный источник напряжения во всем диапазоне изменения выходного тока. Однако, во многих случаях, для ограниченного диапазона изменения выходного тока некоторые источники можно рассматривать как идеальные. Например, источник питания в диапазоне рабочих токов имеет очень малое внутреннее сопротивление, которым можно пренебречь, по сравнению с сопротивлением нагрузки. Или другой пример, выходное сопротивление операционного усилителя, охваченного отрицательной обратной связью, может достигать нескольких сотых долей Ома. Таким внутренним

сопротивлением можно пренебречь и рассматривать выход операционного усилителя как идеальный источник напряжения в диапазоне допустимых выходных токов.

Источник тока. Под *идеальным источником тока* понимают такой элемент цепи, через выводы которого протекает ток с заданным законом изменения во времени независимо от напряжения между выводами. Вольтамперная характеристика и условные графические

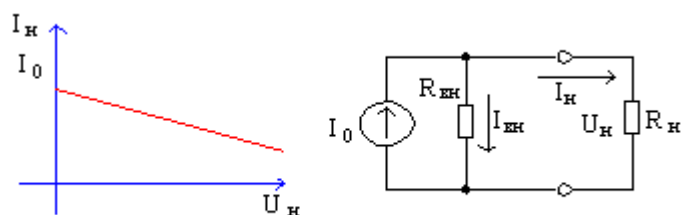


Рис. 1.6. Реальный источник тока

изображения идеального источника тока показана на рис.1.5. Независимость тока от напряжения означает, что внутренняя проводимость источника, куда может ответвляться ток, равна 0, а внутреннее сопротивление равно бесконечности. Вольтамперная характеристика и схема реального источника тока показана на рис.6. При увеличении напряжения на нагрузке за счет увеличения сопротивления нагрузки увеличивается внутренний ток источника тока. При этом меньшая часть тока I_0 поступает в нагрузку. Выходной ток I_n будет равен

$$I_n = I_0 - I_{вн} = I_0 - U_n / R_{вн}.$$

Из формулы видно, что чем больше внутреннее сопротивление источника тока, тем меньше внутренний ток $I_{вн}$ и большая часть тока I_0 отдается в нагрузку. В пределе при $R_{вн} = \infty$ весь ток I_0 отдается в нагрузку, и ток нагрузки не будет зависеть от напряжения на нагрузке. В этом случае имеем дело с идеальным источником тока. Итак, в идеальном источнике тока внутреннее сопротивление равно бесконечности. В идеальном источнике тока при бесконечной величине сопротивления нагрузки (обрыв цепи нагрузки) на его зажимах будет напряжение бесконечной величины. Это конечно идеализация – нельзя построить источник тока, у которого величина внутреннего сопротивления равна бесконечности. Однако на практике используются источники тока, построенные на транзисторах, с внутренним сопротивлением, достигающим величин многих мегом и более, работающие в ограниченном диапазоне выходных напряжений. Такие источники тока широко используются в схемах дифференциальных и операционных усилителей, при построении цифро-аналоговых преобразователей, при передаче сигналов по токовой петле и др.

Реальные источники напряжения и тока эквивалентны. Это означает, что относительно своих зажимов схемы ведут себя одинаковым образом, т.е. при анализе схемы один и тот же источник можно рассматривать как реальный источник напряжения или реальный источник тока. Условия эквивалентности можно получить из выражения для напряжения реального источника напряжения

$$U_n = U_0 - I_n R_{вн}.$$

Разделим правую и левую части уравнения на $R_{вн}$, получим

$$U_n / R_{вн} = U_0 / R_{вн} - I_n.$$

Введем обозначения $U_0 / R_{вн} = I_0 = \text{const}$; $U_0 / R_{вн} = I_{вн}$ и запишем уравнение в следующем виде

$$I_{вн} = I_0 - I_n \quad \text{или} \quad I_0 = I_{вн} + I_n.$$

Причем на сопротивлениях $R_{вн}$ и R_n падает одно и то же напряжение U_n , т.е. они соединены параллельно

$$I_0 = U_n / R_{вн} + U_n / R_n.$$

Отсюда приходим к схеме реального источника тока, показанного на рис.1.6.

Раз схемы реальных источников напряжения и тока эквивалентны, то возникает вопрос, когда использовать при анализе схемы тот или иной источник? Ответ простой. Используйте тот тип источника, при котором проще анализировать работу схемы. На практике часто поступают следующим образом. Если внутреннее сопротивление источника намного меньше сопротивления нагрузки, то такой источник целесообразно рассматривать как источник напряжения. И в первом приближении величиной внутреннего сопротивления можно пренебречь. Если внутреннее сопротивление намного больше сопротивления нагрузки, то

такой источник рассматривают как источник тока. И при первоначальном анализе считают его идеальным. При более детальном анализе схемы учитывают не идеальность источника тока.

1.5. Делитель напряжения

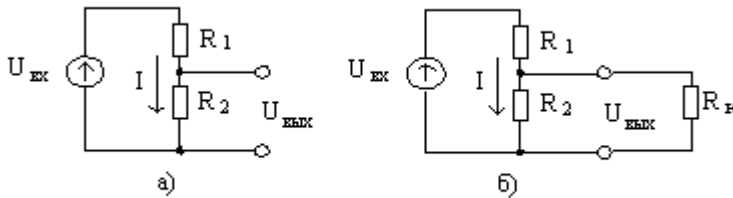


Рис. 1.7. Делитель напряжения

Схема делителя напряжения показана на рис.1.7, а. Делитель напряжения очень часто встречается в различных схемах. Найдем $U_{\text{вых}}$ схемы.

$$U_{\text{вых}} = I R_2 = U_{\text{вх}} R_2 / (R_1 + R_2).$$

Схема так названа, потому что входное напряжение делится между напряжениями на резисторах пропорционально их величинам. Действительно, так как через резисторы протекает один и тот же ток, получим

$I = U_{R1}/R_1 = U_{R2}/R_2$, т.е. $U_{R1}/U_{R2} = U_1/U_2$.

Делитель напряжения часто используется для получения напряжения нужной величины из большего напряжения. Пусть $U_{\text{вх}} = 15 \text{ В}$, $R_1 = 2 \text{ кОм}$, а $R_2 = 1 \text{ кОм}$. Найдем выходное напряжение $U_{\text{вых}}$. Подставляя в формулу для выходного напряжения делителя значения входного напряжения и резисторов получим результат $U_{\text{вых}} = 5 \text{ В}$. Таким образом мы из напряжения 15 В получили напряжение на выходе делителя, равное 5 В. Подбирая величины сопротивлений можно получить на выходе любое напряжение ниже 15 В. Выход делителя напряжения можно использовать в качестве источника напряжения. Но что произойдет с выходным напряжением, если к выходу подключить сопротивление нагрузки, например 1 кОм? Учитывая, что параллельно сопротивлению R_2 подключено сопротивление нагрузки R_n такой же величины, то эквивалентное сопротивление будет равно 0,5 кОм. Воспользовавшись формулой для выходного напряжения делителя получим $U_{\text{вых}} = 3 \text{ В}$. Напряжение уменьшилось. Значит, делитель напряжения мы не можем использовать в качестве идеального источника тока, т.к. величина выходного напряжения зависит от выходного тока. Следовательно, делитель напряжения следует рассматривать как реальный источник напряжения. Правомочность замены схемы делителя напряжения схемой реального источника напряжения дает теорема об эквивалентном генераторе.

1.6. Теорема об эквивалентном генераторе

Согласно теореме об эквивалентном генераторе любую линейную схему относительно двух ее выводов можно заменить эквивалентным генератором, величина источника напряжения которого равна напряжению холостого хода на зажимах выделенной ветви, а внутреннее сопротивление равно входному сопротивлению двухполюсника.

Эквивалентный генератор не что иное, как реальный источник напряжения. Внутреннее сопротивление генератора также может быть найдено по формуле

$$R_{\text{вн}} = U_{\text{хх}}/I_{\text{кз}},$$

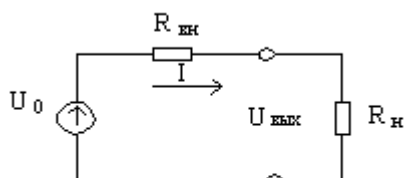


Рис. 1.8.

где $U_{\text{хх}}$ - напряжение холостого хода на выводах схемы (напряжения на выходе без нагрузки), $I_{\text{кз}}$ - ток короткого замыкания выводов схемы.

Для схемы, состоящей из резисторов, источников напряжения и токов внутреннее сопротивление находят как сопротивление между выводами схемы при равенстве нулю напряжений и токов всех источников, т.е. в схеме источники напряжения замыкаются, а источники тока размыкаются.

каются.

Заменим схему делителя напряжения, представленную на рис.1.7 а эквивалентным генератором и определим напряжение на выходе схемы с нагрузкой (рис.1.8).

$$U_{\text{экв}} = U_0 = U_{\text{вх}} R_2 / (R_1 + R_2) = 15 \text{ В } 1 \text{ кОм} / (1 \text{ кОм} + 2 \text{ кОм}) = 5 \text{ В}.$$

Внутреннее сопротивление генератора равно параллельному соединению R_1 и R_2

$$R_{\text{вн}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 0,667 \text{ кОм}.$$

Напряжение на выходе схемы на рис.8 представляет собой напряжение на выходе делителя напряжения $R_{\text{вн}}$ $R_{\text{н}}$ и будет равно $U_{\text{вых}} = U_0 R_{\text{н}} / (R_{\text{вн}} + R_{\text{н}}) = 5 \text{ В } 1 \text{ кОм} / (0,667 \text{ кОм} + 1 \text{ кОм}) = 3 \text{ В}$. Мы получили тот же самый результат, что и при расчете схемы на рис.1.7,б.

Представление сложной цепи с неизменными параметрами в виде эквивалентного генератора (реальным источником напряжения) часто позволяет упростить анализ схемы.

1.7. Контрольные вопросы

- 1) Дайте определение электрическому току, напряжению, мощности.
- 2) Как обозначается напряжение на схемах?
- 3) Как измерить напряжение? Что имеется в виду, когда говорят "напряжение в точке".
- 4) Какая зависимость тока от напряжения резистора, емкости и индуктивности?
- 5) Сформулируйте закон Ома.
- 6) Чему равно общее сопротивление при последовательном и параллельном включении резисторов?
- 7) Чему равна общая емкость при последовательном и параллельном включении конденсаторов?
- 8) Приведите основные параметры резистора, конденсатора.
- 9) Как определить мощность, рассеиваемую на резисторе?
- 10) Что такое динамическое сопротивление. Чем оно отличается от обычного?
- 11) Дайте определение идеальным источникам тока и напряжения.
- 12) Приведите схемы реальных источников тока и напряжений. Чему равны значения тока и напряжения на выходе реальных источников тока и напряжений?
- 13) Как перейти от реального источника напряжения к реальному источнику тока?
- 14) Нарисуйте схему делителя напряжений. Чему равно напряжения на выходе делителя напряжений?
- 15) Сформулируйте теорему об эквивалентном генераторе. Как преобразовать схему на основе теоремы об эквивалентном преобразователе?