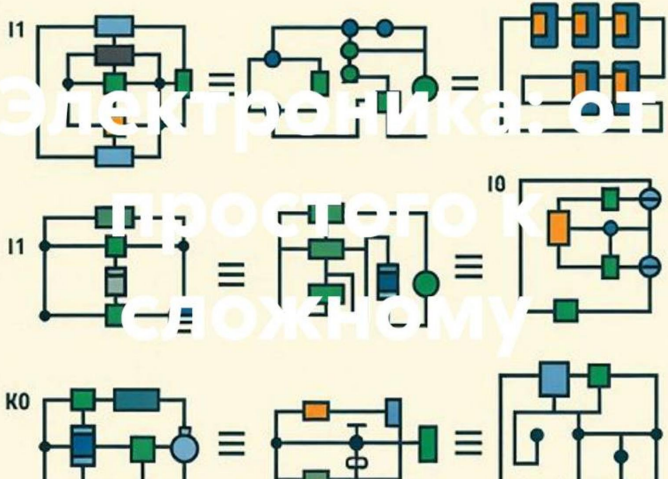
Денис Одинцов

Основы работы элакетронных схем от самого простого до цифровых микросхем



Электроника от простого к сложному

Денис Одинцов

Электроника: от простого к сложному

https://litres.ru/74697129
SelfPub; 2026

Аннотация

В книге в доступной форме излагаются основы работы электронных схем - от самого простого до цифровых микросхем.

Для интересующихся электроникой всех возрастов.

Содержание

Глава 1. Постоянный ток. Первые радиодетали 4
Глава 2. Переменный ток 46
Конец ознакомительного фрагмента. 116

Денис Одинцов Электроника: от простого к сложному

Глава 1. Постоянный ток. Первые радиодетали

Электроника имеет короткую, но богатую событиями историю. Первый ее период связан с простейшими передатчиками ключевого действия и способными принимать их сигналы приемниками, которые появились в начале XX века. Затем наступила эпоха вакуумных ламп, которая ознаменовала собой возможность претворения в жизнь смелых идей. Сейчас мы являемся свидетелями нового этапа развития электроники, связанного с появлением элементов на твердом теле. Технология появления больших интегральных схем (БИС) дает возможность производить кристаллы кремния, на основе которых создают калькуляторы, вычислительные машины и сотовые телефоны. Развитие технологии сверхбольших интегральных схем (СБИС) открывает возможность создания новых замечательных устройств.

Если вас заинтересовали успехи электроники и есть же-

лание узнать об электронных устройствах побольше, то эта книга – то, что вам нужно.

Протоны и электроны

Повседневный опыт приучил нас к тому, что твердые тела и жидкости имеют плотную и непрерывную структуру. А вместе с тем структура у них, можно сказать, ажурная. Любое вещество – вода, бумага, металлы, пластмасса – больше напоминают хокеистов на льду во время игры, чем зрителей, наблюдающих за игрой, которых, как правило, гораздо больше. Мы не видим этой ажурности, но точными физическими исследованиями установлено, что сгустки вещества - атомы и электроны – находятся друг от друга на расстоянии, во много раз превышающих их размеры. Если предположить, что атомное ядро имеет размеры футбольного мяча, то для соблюдения пропорций нужно представить, как на расстоянии в сотни и тысячи метров от него летают электроны размером с горошину, а все остальное – пустота. А расстояния между соседними атомами в этом масштабе совсем огромны – это десятки и сотни километров.

В любом веществе найдется некоторое количество атомов, потерявших электроны со своих внешних орбит. В твердом теле атомы закреплены в определенных точках пространства, связаны друг с другом в плотный каркас кристаллической решетки. В жидкостях атомы связаны слабее, именно поэтому жидкость "мягкая", она легко изгибается, течет. В любом случае атомы пошатываются, совершают

небольшие движения, колеблются. В процессе этих хаотических тепловых колебаний атомы, грубо говоря, "сбрасывают" внешние электроны, те, которые больше всего удалены от ядра, слабее других привязаны к нему электрическими силами. Вырвавшиеся из атомов электроны перемещаются в межатомном пространстве, они свободны.

Атом, у которого электронов на орбитах больше, чем протонов в ядре, – отрицательный ион, а потерявший один или несколько электронов, – это положительный ион. В твердых телах такие положительные ионы неподвижны, в жидкостях и особенно в газах они, как и электроны, могут свободно двигаться.

Проводники, полупроводники и изоляторы

Специалисты по электричеству привыкли делить все вещества на три группы – проводники, полупроводники и диэлектрики (изоляторы). В диэлектриках свободных зарядов очень мало, почти нет. Полупроводники – это вещества, в которых свободных зарядов немного, но они все-таки есть. К проводникам относятся вещества, в которых свободных зарядов очень много.

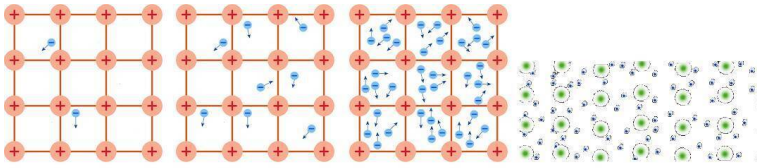


Рис. 1.1. Изоляторы, полупроводники и проводники

1.1. Ток и напряжение

1.1.1. Электрический ток

Электрический ток – это направленное движение электрически заряженных частиц внутри проводника, например, меди или железа. Когда-то считалось, что эти частицы заряжены положительно, но на самом деле это электроны, которые имеют отрицательный заряд.

Ток имеет направление, или полярность, считается, что заряды всегда текут от положительного полюса к отрицательному. Первым человеком, который ввел эту идею, был Бенджамин Франклин, который не обладал средствами и знаниями, чтобы доказать, что в действительности ток обусловлен отрицательно заряженными электронами, а не гипотетическими положительными частицами. Эта условность осталась по сей день, хотя в действительности электроны движутся от отрицательного полюса к положительному. Положительный полюс обычно указывается на схемах знаком "+" или красным цветом, а отрицательный – знаком "-" или черным цве-

том.

Как можно измерить ток? Измерить поток воды достаточно просто: нам нужны секундомер и счетчик воды, текущей по трубе. Скорость этого потока зависит от диаметра трубы и скорости воды и равна количеству литров, которые проходят через секцию трубы в секунду: могут пройти десять, сто или тысячи литров в секунду. Для измерения силы электрического тока поступают подобным образом, но вместо измерения количества воды мы должны считать электрические заряды, или электроны, которые проходят в электрическом проводе за секунду (через данное сечение проводника).

Единицей измерения электрического тока, или силы тока, является ампер (А), названный в честь первооткрывателя электрического тока – великого французского физика Андре-Мари Ампера, жившего на рубеже XVIII-XIX веков. Один ампер соответствует скорости прохождения через сечение проводника заряда в 1 кулон (К) за 1 секунду. (Один кулон – суммарный заряд примерно 6 миллиардов миллиардов (или $6{,}24 \cdot 10^{18}$) электронов.) Символом ампера является буква "А". В формулах сила тока обозначается буквой "I". Токи небольшой величины могут быть выражены в мА или даже в мкА.

Человек начинает ощущать ток в своем теле при его величине 0,005 А. Ток 0,05 А опасен для жизни. Ток в люминесцентной лампе – 0,15 А, в лампе накаливания – 0,2-1 А, в холодильнике – 0,5-0,8 А, в бытовых нагревательных прибо-

рах – 2-8 А, в электродвигателе трамвайного вагона – 100 А и выше, в индукторе печи для плавления алюминия – 18000 А.

1.1.2. Напряжение и разность потенциалов

Сколько раз мы задавали себе вопросы вроде "При каком напряжении работает этот электрический прибор?" – "220 вольт", или "Какую батарейку нужно вставить в этот пульт?" – "1,5 В". Как аналогию можно привести в пример воду, которая может течь, потому что есть разница в высоте. Похожим образом течет электрический ток, если существует разница в уровнях, или, лучше сказать, разность потенциалов, как будто точки расположены на разной высоте.

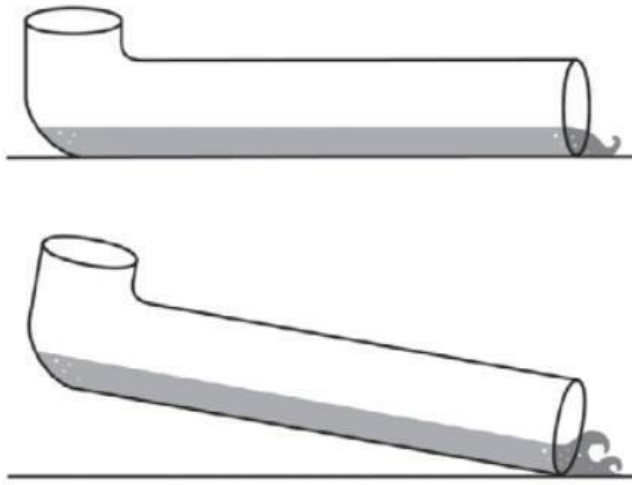


Рис. 1.2. Сила потока воды зависит от разницы в высоте

Если мы возьмем очень длинную трубу, положим ее на землю и наполним ее водой (рис. 1.2), вода выйдет из другого конца с небольшой силой. Если мы поднимем один из концов трубы, то вода выйдет с большей силой. Чем больше разница в высоте, тем больше сила (или давление) на выходе из трубы.

Представим себе, что можно некоторый положительный заряд разместить в одном месте, а отрицательный – в другом. Между ними появится так называемое электрическое поле. Если в этом поле разместить некоторую положитель-

но заряженную частицу, то она будет двигаться в сторону отрицательного заряда. Электрический заряд, расположенный в электрическом поле, обладает определенным уровнем потенциальной энергии, потому что находится в определенной точке поля и является неподвижным, хотя под воздействием этого поля его тянет в сторону отрицательного заряда. Потенциальная энергия, которую частица стремится перевести в энергию движения, деленная на количество заряда, называется напряжением (ее можно сравнить с высотой, с которой падает вода, например, с высотой водопада). Под напряжением мы имеем в виду разницу потенциалов (вроде разницы высот).

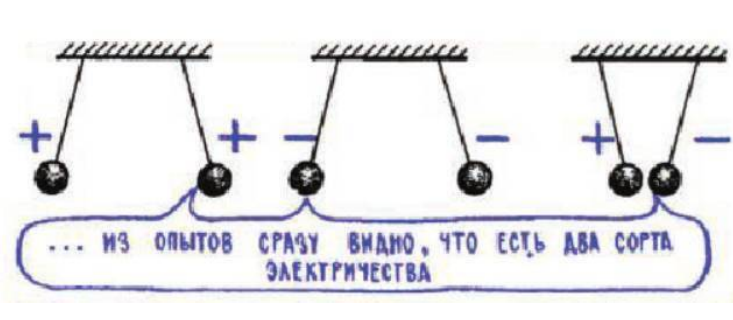


Рис. 1.3. Заряды разных знаков притягиваются друг к другу

Единицей измерения напряжения является вольт (В), в честь одного из основоположников учения об электричестве,

итальянского ученого, графа Алессандро Вольта, жившего на рубеже XVIII-XIX веков, также известного изобретением первого гальванического элемента, так называемого Вольтового столба. В формулах и на схемах напряжение обозначается буквой "U".

Обозначение источника напряжения на электрической схеме, которое применяется на практике, приведено на рис. 1.4.

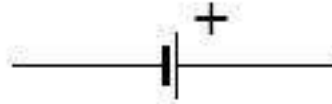


Рис. 1.4. Условное обозначение источника напряжения на электрических схемах

1.1.3. Закон Ома

Это один из очень простых, понятных и в то же время очень важных законов электрической цепи. Согласно ему, чем больше электрическое напряжение между двумя точками схемы, тем быстрее будут перенесены заряды, образующие ток, тем больше будет ток. Также он увеличивается при уменьшении сопротивления цепи (сопротивление измеряется в омах (Ом)). Этот закон был открыт в 1826 году и носит название закона Ома:

$I = U / R$,

т.е. ток I в цепи прямо пропорционален приложенному к ее выводам напряжению U и обратно пропорционален сопротивлению цепи R. При своем движении электроны сталкиваются с ионами кристаллической решетки. Чем больше в веществе электронов и чем меньше столкновений у них с ионами, тем меньше удельное сопротивление вещества.

1.1.4. Первая радиодеталь - резистор

Резисторы уменьшают поток электрического тока. Представьте, что вы поливаете розы в саду из резинового шланга, как вдруг поток воды останавливается. Вы поворачиваетесь и видите своего друга, который наступает ногой на шланг, уменьшая тем самым поток воды. Резисторы для тока играют роль тонкой или толстой (в зависимости от того, какой величины сопротивление требуется) резиновой трубки. Высокое значение сопротивления означает, что через материал может проходить лишь ток малой величины.

Сопротивление является свойством всех электрических компонентов. Задача резисторов заключается в том, что они должны оказывать сопротивление электрическому току. Закон Ома подсказывает, что можно установить в цепи необходимую силу тока, создав в этой цепи точно дозированное, то есть строго определенное сопротивление. Задавшись величиной тока I и зная напряжение U источника питания, можно по формуле $R = U / I$, вытекающей из закона Ома, вычислить это необходимое сопротивление. Резистор является

наиболее часто используемым элементом электрических цепей. Резисторы бывают с постоянным и переменным сопротивлением. Они имеют различные формы и размеры, в зависимости от условий их применения и предъявляемым к ним требованиям.

Сейчас резисторы в виде микроскопических полупроводниковых пылинок в основном ушли в интегральные схемы, но в то же время всё ещё выпускаются в виде отдельных (дискретных) деталей. Существует два основных типа резисторов – угольные и металлопленочные. Угольные резисторы создают, смешивая порошкообразные изолятор и уголь в пропорциях, необходимых для получения необходимого сопротивления. А металлопленочные резисторы (более распространенные в настоящее время) создают, напыляя тонкую пленку металла на керамическую подложку, а затем удаляя некоторый объем напыления до получения необходимого сопротивления.

Условное обозначение резистора показано на рис. 1.5.

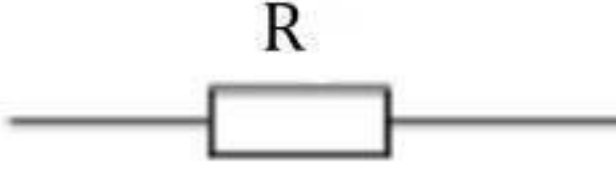


Рис. 1.5. Условное обозначение резистора
Таблица 1.1

ЦВЕТОВАЯ КОДИРОВКА РЕЗИСТОРОВ

Цветовой код, использующий
две значащих цифры



Замечание: может присутствовать пятая полоса, которая представляет фактор надежности и может быть проигнорирована.

ЦВЕТНЫЕ ПОЛОСЫ				
	Первая	Вторая	Количество нулей	Допуск четвертая
Черный	0	0	—	
Коричневый	1	1	0	
Красный	2	2	00	
Оранжевый	3	3	000	
Желтый	4	4	0 000	
Зеленый	5	5	00 000	
Синий	6	6	000 000	
Фиолетовый	7	7		
Серый	8	8		
Белый	9	9		
Золотой			0,1	5%
Серебряный			0,01	10%
Нет полосы				20%

Цветовой код, использующий три значащие цифры для резисторов с допуском 1%

ЦВЕТНЫЕ ПОЛОСЫ				
	Первая	Вторая	Третья	Множитель четвертая
Черный	0	0	0	—
Коричневый	1	1	1	0
Красный	2	2	2	00
Оранжевый	3	3	3	000
Желтый	4	4	4	0 000
Зеленый	5	5	5	00 000
Синий	6	6	6	000 000
Фиолетовый	7	7	7	

На практике сопротивление резисторов отличается от номинального в связи с воздействие температуры и влажности, а также нагрева при протекании через них тока и других факторов. Максимальное возможное отклонение называется допуском и задается в процентах относительно сопротивления резистора. Выпускаются резисторы с допусками ±20%, ±10%, ±5%, ±2%, ±1%.

Значения номиналов импортных резисторов нанесены на них в виде цветных полос. Первые две полосы означают первую и вторую цифры номинала, третья - количество нулей, на которое необходимо умножить значащие цифры, а четвертая полоса – допуск резистора (табл. 1.1).

Последовательное и параллельное включение резисторов

Рассмотрим последовательное и параллельное соединение резисторов.

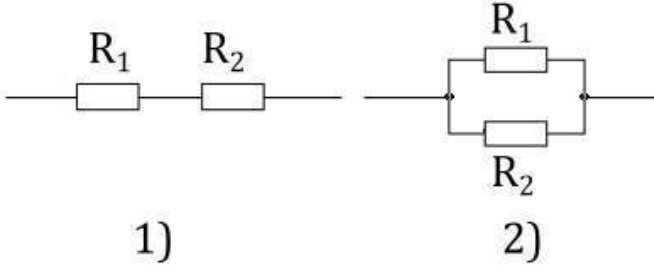


Рис. 1.6. Последовательное (1) и параллельное (2) соединение резисторов

Сопротивление двух последовательно включенных резисторов R_1 и R_2 (рис. 1.6, 1) равно их сумме:

$R_{общ} = R_1 + R_2$.

Видно, что при последовательном соединении мы всегда получаем сопротивление больше любого из этих резисторов.

При параллельном соединении резисторов (рис. 1.6, 2) напряжение на каждом из них равно U (одинаковое), а ток в цепи равен сумме токов через резисторы:

$U / R_{общ} = U / R_1 + U / R_2$,

отсюда

$1 / R_{общ} = 1 / R_1 + 1 / R_2$,

или (что то же самое)

$R_{общ} = R_1 \cdot R_2/(R_1 + R_2)$.

При параллельном соединении общее сопротивление меньше наименьшего из сопротивлений (это остается верным и при большем количестве резисторов). Чем больше резисторов включены параллельно друг другу, тем меньше их общее сопротивление. В случае последовательного соединения, наоборот, чем больше резисторов мы включим друг за другом, тем больше будет их общее сопротивление.

Делитель напряжения

Рассмотрим делитель напряжения, который широко используется в электронных схемах. В любой настоящей схеме

можно найти несколько делителей напряжения. Это схема, на вход которой подается некоторое входное напряжение или сигнал (чуть позже мы начнем знакомиться с синусоидальным напряжением и его представлением в электронике), а с выхода снимается напряжение, являющееся частью входного напряжения или сигнала.

Пусть нам надо получить напряжение на выходе схемы меньше, чем на входе. Простейший делитель представлен на рис. 1.7. Чему здесь равно Uвых? Представим, что нагрузки нет, тогда ток равен

$I = U_{вх} / (R_1 + R_2)$.

Выходное напряжение – это напряжение на резисторе R_2, поэтому

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

Видно, что выходное напряжение всегда меньше входного, т.е. данная схема успешно справляется с этой задачей. Но следует помнить, что мы предположили нулевое сопротивления источника напряжения на входе и бесконечно большое сопротивление нагрузки. Ниже будет рассказано о методе Тевенина, который позволяет определить $U_{вых}$ и $R_{вых}$ нагруженного делителя.

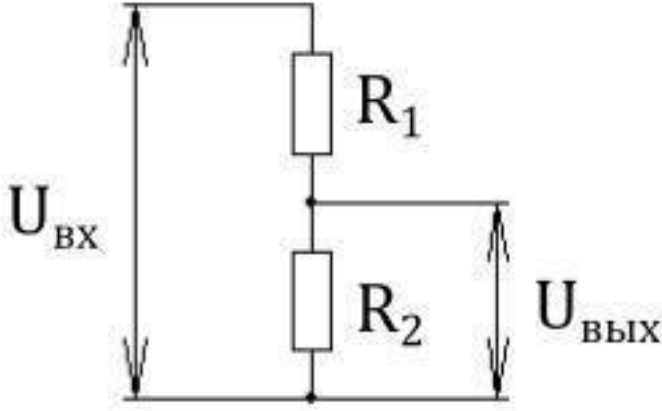


Рис. 1.7. Делитель напряжения

Особые делители - добавочное сопротивление и шунт

Часто в делителе напряжения одно из сопротивлений – это сама нагрузка. Необходимое напряжение на ней в этом случае можно установить, подобрав сопротивление остальной части делителя, обычно его называют "гасящее сопротивление", и это очень удачное название. Действительно, гасящее сопротивление как бы гасит излишек напряжения, берет его на себя с таким расчетом, чтобы нагрузке досталось только то, что ей требуется (рис. 1.7).

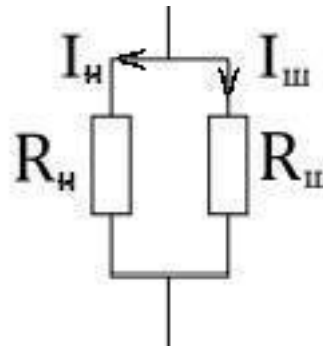


Рис. 1.8. Шунт

Аналогично можно пропустить через нагрузку необходимый ток $I_н$, подключив сопротивление $R_ш$ параллельно ей (рис. 1.8). Оно получило название «шунт» (в переводе с английского - «обходной путь»), а само подключение шунта называется шунтированием. Шунт включают в том случае, когда ток в нагрузке $I_н$ был бы слишком большим. Или, можно сказать иначе, шунтирование снижает ток через нагрузку, ответвляя в шунт часть $I_ш$ общего тока ($I_ш + I_н$). Чем меньше сопротивление шунта, тем сильнее шунтирование, то есть тем меньше общая часть общего тока достается нагрузке и тем большая его часть $I_ш$ пойдет через шунт.

1.2. Законы Кирхгофа и их использование

Законы, или правила, Кирхгофа - это соотношения, которые соблюдаются между токами и напряжениями на участках абсолютно любой электрической цепи. С помощью зако-

нов Кирхгофа можно рассчитать любые электрические цепи как постоянного, так и переменного тока.

В замкнутой цепи постоянного тока не могут скапливаться электрические заряды, так как это вызвало бы изменение потенциалов точек цепи. Поэтому сумма токов, втекающих в узел, равна сумме токов, вытекающих из узла. Так звучит первый закон Кирхгофа. Его можно сформулировать и по другому: сумма токов в узле равна нулю:

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

При записи уравнений по первому закону Кирхгофа токи, направленные к узлу, берут с одним знаком, как правило со знаком "плюс", а токи, направленные от узла, – с противоположным знаком. Например, для узла 1 на рис. 1.9

$- I_1 + I_2 + I_3 = 0$

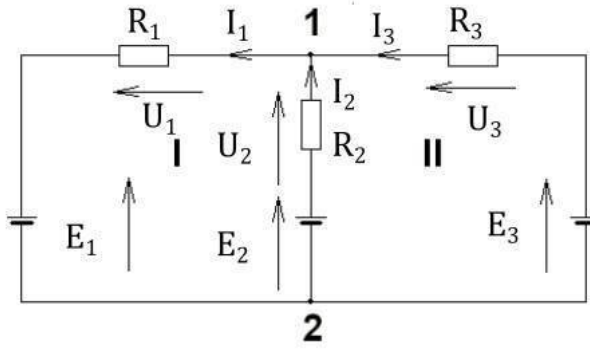


Рис. 1.9

Второй закон Кирхгофа – сумма ЭДС в любом контуре электрической цепи равна сумме падений напряжения на всех элементах этого контура:

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

Для контуров I и II на рис. 1.9 данное правило с учетом полярности ЭДС и напряжений имеет вид:

$E_1 - E_2 = - U_1 - U_2$

$E_2 - E_3 = U_2 - U_3$

Законы Ома и Кирхгофа используют, как правило, при расчете несложных электрических цепей с небольшим числом контуров, хотя теоретически с их помощью можно рассчитать электрические цепи любой сложности.

1.2.1. Что такое на схеме "4,5В"?

Вы наверняка встречали схемы, в которых напротив узлов написано "U_1" и "U_2" или 6 В и 4,5 В. Но ведь напряжение измеряют между точками схемы. Разберемся, что это означает. Возьмем некоторую схему, сейчас совершенно неважно, что это за схема, пусть это будет схема, изображенная на рис. 1.10. На нижней точке схемы указан знак "земля". Обычно за "землю" (иногда говорят о "корпусе") принимают один из выводов источника питания схемы, как правило "минус". Напряжение – это разность потенциалов. Потенциал "земли" принимают равным нулю. Тогда потенциал φ_A в точке А схемы будет равен напряжению между этой точкой и "землей"/корпусом. Специалисты говорят: "Измерь напряжение в точке А", имея в виду разность потенциалов между этой точкой и корпусом, поскольку потенциал корпуса нулевой:

$U_A = \varphi_A - \varphi_{GND} = \varphi_A - 0 = \varphi_A$

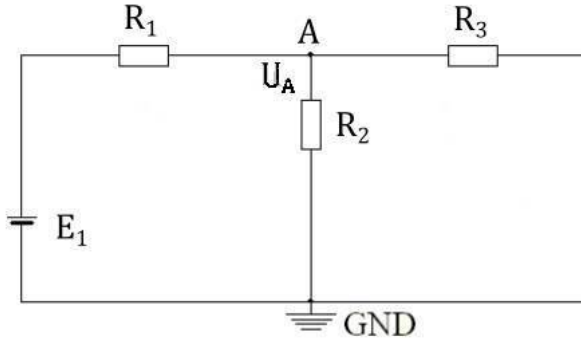


Рис. 1.10. Напряжение в точке А измеряется относительно "земли"

Аналогично для любой другой точки схемы.

Условные обозначения "корпуса" и "земли" приведены на рис. 1.11. О "земле" чаще говорят в электротехнике, когда речь идет, например, о моторах холодильников, стиральных машин, нагревателях и другом подобном оборудовании. При рассмотрении схем электронных устройств, как правило, используют обозначение, приведенное на рис. 1.11, 1.



Рис. 1.11. "Корпус" (1) и "земля" (2) в электрических схемах

Для закрепления знаний о законах Кирхгофа рассмотрим следующую схему (рис. 1.12).

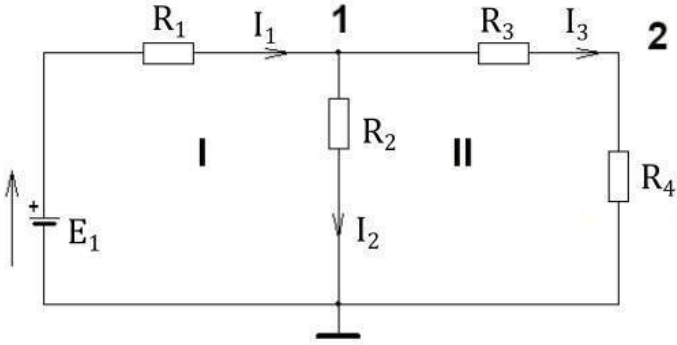


Рис. 1.12.

Согласно первому закону Кирхгофа

$I_1 = I_2 + I_3$

Согласно второму закону Кирхгофа

$E_1 = I_1R_1 + I_2R_2$

$– I_2R_2 + I_3R_3 + I_3R_4 = 0$

Пусть $E_1 = 15$ В, $R_1 = R_3 = 5$ Ом, $R_2 = R_4 = 10$ Ом.

Тогда

$I_1 = 15/11$ А, $I_2 = 9/11$ А, $I_3 = 6/11$ А.

Согласно закону Ома напряжения в точках 1 и 2 равны

$U_{т1} = I_2R_2 = (9/11) \cdot 10 = 8{,}18$ В

$U_{т2} = I_3R_4 = (6/11) \cdot 10 = 5{,}45$ В

Тогда напряжение на резисторе R_3 равно разности потенциалов в точках 2 и 1, а значит - этих напряжений:

$U_{R3} = U_{т1} - U_{т2} = 8{,}18 - 5{,}45 = 2{,}73$ В

Привыкайте к измерению напряжений относительно "корпуса" и к тому, что напряжение на элементах схемы равно их разнице. Также необходимо помнить, что в случае измерения тока через какую-то ветвь амперметр необходимо включать в ее разрыв.

1.3. Источники питания

1.3.1. Что такое "внутреннее сопротивление"?

Если говорить о реалиях, то напряжения, которые мы получаем от батареек, аккумуляторов и прочих источников питания, в действительности немного меньше, чем об этом заявляют производители. Если вы купили батарейку "Крона" (9 В) для настольных часов или пальчиковую (1,5 В) для пульта телевизора, то в действительности после того, как вы

подключите их к к нагрузке (к часам и к пульту), напряжение немного упадет, на очень малую величину, но упадет. Причина в том, что все источники напряжения имеют ненулевое внутреннее сопротивление. К сожалению, оно есть, и является таким же полноправным элементом схемы, как и все внешние радиодетали, поэтому, когда вы вставите батарейку в пульт, потечет ток, и на этом сопротивлении по закону Ома окажется некоторое напряжение. Если представить батарейку или аккумулятор как последовательно соединенные идеальный источник ЭДС (именно так называется источник питания без потерь) и внутреннее сопротивление, то после замыкания цепи образуется делитель напряжения, работу которого мы рассмотрели выше. ЭДС распределится между $R_{внутр}$ и сопротивлением устройства-нагрузки $R_{нагр}$. Если увеличить ток (или уменьшить $R_{нагр}$), то по закону Ома увеличится падение на этом внутреннем сопротивлении, и напряжение на выходе, которое достанется $R_{нагр}$, окажется еще меньше. Чтобы изменение нагрузки как можно меньше влияло на внешнее напряжение источника питания, $R_{внутр}$ стараются сделать как можно меньше. Еще одним примером того, что это происходит, является сеть 220 В (напряжение переменное, но суть не меняется). У нее внутреннее сопротивление составляет доли ома, но все же оно есть (сказывается сопротивление линий электропередачи (ЛЭП)) и теоретически напряжение должно быть чуть меньше 220 В.

Теперь, когда вы знаете, что такое внутреннее сопротив-

ление, можно обсудить, что такое источник напряжения и что такое источник тока.

1.3.2. Источник напряжения и источник тока

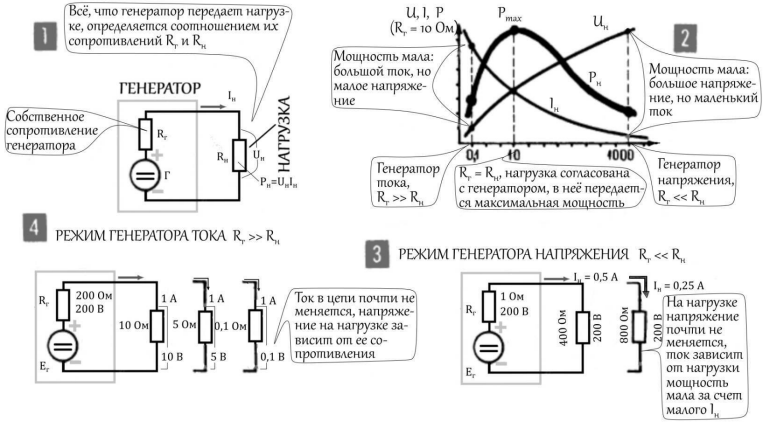


Рис. 1.13. Режимы работы генератора

Из всех возможных соотношений между сопротивлениями генератора и нагрузки можно выделить два типичных случая.

Случай первый: сопротивление генератора $R_г$ во много раз меньше, чем сопротивление нагрузки $R_н$. Такой источник называют источником напряжения, отмечая этим, что почти вся ЭДС приложена к нагрузке и что при изменении нагрузки напряжение на ней почти не меняется (рис. 1.13;

3). Для иллюстрации - числовой пример.

Предположим, что E = 200 В, $R_г$ = 1 Ом и $R_н$ = 400 Ом. На внутреннем сопротивлении генератора остается около 0,5 В, нагрузке достается примерно 199,5 В. Увеличим $R_н$ до 800 Ом, на нагрузке, несмотря на это, останется примерно такое же напряжение, какое было, - около 199,75 В; на внутреннем сопротивлении генератора останется около 0,25 В. Если уменьшить $R_н$ до 100 Ом, то на нем все равно будет около 198 В, на $R_г$ потеряется около 2 В.

Во втором типичном случае сопротивление генератора $R_г$ во много раз больше сопротивления нагрузки $R_н$. Это режим генератора тока, он назван так потому, что ток в цепи почти не меняется при изменении $R_н$ (рис. 1.13; 4).

Числовой пример: ЭДС генератора E = 200 В, $R_г$ = 200 Ом и $R_н$ = 1 Ом. Легко подсчитать, что ток в цепи - около 1 А и он примерно таким и останется, если увеличить или уменьшить $R_н$ в несколько раз.

Оба эти режима имеют свои достоинства и недостатки, но генератор напряжения встречается гораздо чаще. В режиме генератора напряжения работают электрическая сеть (внутреннее сопротивление - десятые и даже сотые доли ома), автомобильный аккумулятор, батарейка карманного фонаря (внутреннее сопротивление новой батарейки - около ома, у старой батарейки - несколько ом).

1.4. Конденсатор

1.4.1. Что это такое?

Простейший конденсатор состоит из двух пластин (или обкладок), находящихся одна перед другой и сделанных из проводящего материала. Между пластинами находится изолирующий материал, называемый диэлектриком (рис. 1.14). Простейшими диэлектриками являются воздух, бумага и слюда.

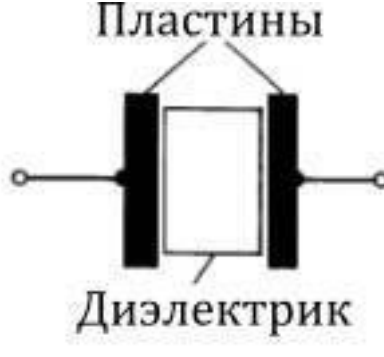


Рис. 1.14. Конденсатор

Основным свойством конденсатора является его способность запасать электрическую энергию в виде электрического заряда.

На рис. 1.15, 1 изображена схема, в которой конденсатор через ключ соединяется с источником питания. Когда ключ замкнут (рис. 1.15, 2), положительный полюс источника "откачивает" электроны с обкладки А, и она приобретает поло-

жительный заряд. Отрицательный полюс источника питания в это время "поставляет" электроны на обкладку В, в результате чего она приобретает отрицательный заряд, по абсолютной величине равный положительному заряду обкладки А. Такой поток электронов называется током заряда. Он продолжает течь до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не сравняется с ЭДС источника питания. В этом случае говорят, что конденсатор полностью заряжен.

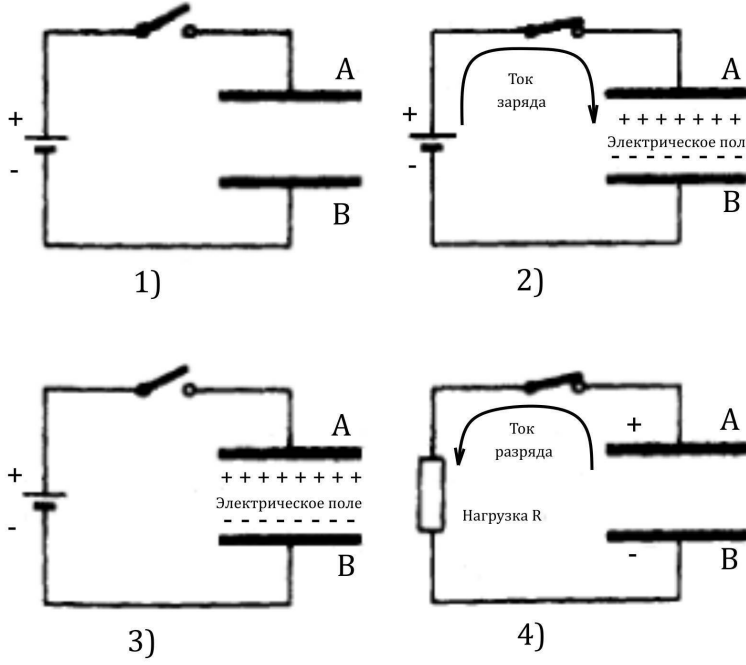


Рис. 1.15. Заряд и разряд конденсатора

Когда конденсатор заряжен, между его обкладками возникает разность потенциалов, а, следовательно, электрическое поле.

Если в момент, когда конденсатор уже зарядился, разомкнуть ключ (рис. 1.15, 3), конденсатор будет хранить заряд. Как мы уже отметили, в этом случае между его обкладками возникнет электрическое поле.

Если соединить обкладки заряженного конденсатора резистором, то начнется процесс разряда, по внешней цепи избыточные заряды будут переходить с одной обкладки на другую, стремясь нейтрализовать друг друга. Во время разряда в цепи тоже течет ток, его величина зависит от емкости, а также ограничивается сопротивлением резистора. Разряд конденсатора, подобно заряду, будет длиться тем дольше, чем больше емкость конденсатора (то есть чем больше зарядов должно уйти с его обкладок) и чем больше сопротивление резистора (разрядной цепи).

Быстрее всего разряд произойдет, если соединить обкладки накоротко.

Предупреждение: так как конденсатор при отключении от источника тока может удерживать потенциал источника питания достаточно долго, обращайтесь с конденсаторами осторожно. Никогда не касайтесь обоих выводов конденсатора рукой до тех пор, пока не разрядите его путем закора-

чивания выводов. Конденсатор в цепи может удерживать потенциал неопределенно долго, если у него нет пути для разряда.

Наблюдая за зарядом и разрядом конденсатора, мы впервые сталкиваемся с тем, что элементы электрической цепи определяют продолжительность тех или иных процессов, в данном случае время заряда и разряда конденсатора. Электрическая цепь, состоящая из R и C, или, как ее часто называют, RC-цепочка, в данном случае чем-то напоминает песочные часы, время "разряда" которых зависит от количества песка и диаметра отверстия, через которое он сыпется. Не случайно их произведение $\tau = RC$ называется постоянной времени.

Способность конденсатора накапливать электрический заряд говорит о наличии у него емкости. Она обозначается как C и измеряется в фарадах (Ф). Фарада - очень большая единица емкости, и она практически не используется. На практике пользуются дробными единицами:

1 микрофарада (мкФ) = 10^{-6} Ф,

1 нанофарада (нФ) = 10^{-9} Ф,

1 пикофарада (пФ) = 10^{-12} Ф.

Если конденсатор емкостью C заряжен до напряжения U, то заряд Q, который накопился на каждой пластине, равен

$Q = C \cdot U$,

где C измеряется в фарадах, U - в вольтах, а Q - в кулонах.

Из этой формулы можно получить другую, которая динамически описывает работу конденсатора:

$I = C \cdot dU/dt$,

т.е. чем быстрее на обкладках конденсатора меняется напряжение, тем больше переменный ток, протекающий через него (подробнее - в части 2, если пока не понятно, не расстраивайтесь).

1.4.2. Параллельное и последовательное соединение конденсаторов

Если конденсаторы соединены параллельно (рис. 1.16, 1), то общая площадь обкладок равна сумме площадей обкладок отдельных конденсаторов, и общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$C = C_1 + C_2$

При этом (поскольку конденсаторы соединены параллельно) максимальное напряжение равно максимально допустимому напряжению того из этих конденсаторов, у которого оно меньше, т.к. про постепенном увеличении напряжения он выйдет из строя первым.

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 1.16, 2) их общая емкость рассчитывается так же, как сопротивление при параллельном соединении резисторов:

$1 / C = 1 / C_1 + 1 / C_2$

При этом (поскольку конденсаторы соединены последо-

вательно) максимально возможное напряжение равно сумме максимально доступных напряжений на отдельных конденсаторах.

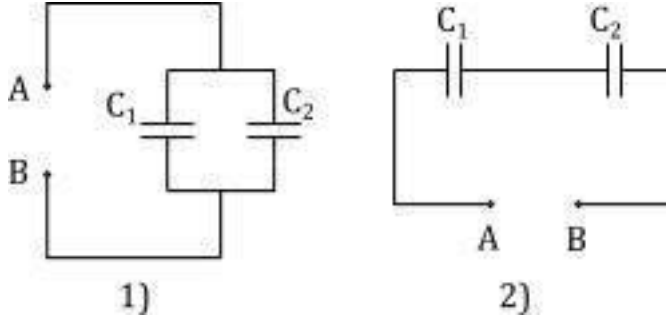


Рис. 1.16. Параллельное и последовательное соединение конденсаторов

1.5. Катушка индуктивности

Индуктивность - это способность извлекать энергию из источника и сохранять ее в виде магнитного поля. Это свойство проводника, предотвращающее резкие изменения текущего через него тока. Например, если ток в катушке увеличивается, магнитное поле вокруг катушки расширяется. Если ток в катушке уменьшается, магнитное поле сжимается. Однако сжатие магнитного поля индуцирует в катушке напряжение, которое поддерживает ток. Таким образом, индуктивность позволяет энергии сохраняться в виде магнитного поля, зависящего от тока. Когда ток уменьшается,

уменьшается и магнитное поле, возвращая в цепь запасенную энергию. На схемах и в тексте индуктивность обозначается буквой L, условное обозначение индуктивности на схемах приведено на рис. 1.17.

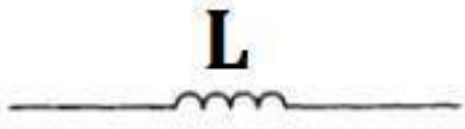


Рис. 1.17. Индуктивность

Долгие годы электричество и магнетизм были известны как совершенно разные, независимые явления. И только в 1820 году датский физик Ханс Кристиан Эрстед обнаружил, что электрический ток действует на стрелку компаса и, следовательно, магнетизм может появиться из электричества. После этого было естественным предположить, что можно осуществить и обратное преобразование: из магнетизма получить электричество - ведь получают же изо льда воду, а из воды - лед. И электричество из магнетизма действительно было получено, но не сразу, а в 1831 году. Эти годы ушли на выяснение одной, как теперь кажется, очень простой истины.

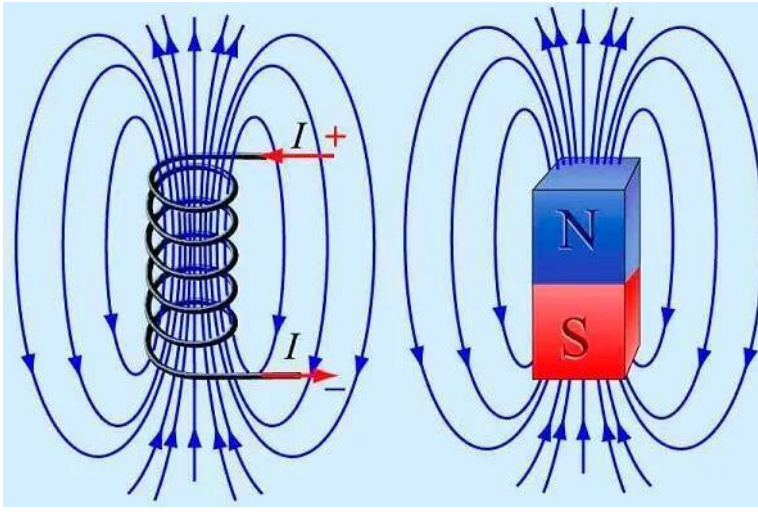


Рис. 1.18. Катушка индуктивности

Электричество из магнетизма впервые получил английский физик Майкл Фарадей. Он самыми разными способами пытался расположить проводник возле магнита, предполагая, что для получения тока нужно лишь придать проводнику удачную форму и найти ему удачное место в магнитном поле. И только спустя много лет Фарадей обнаружил, что для получения тока в проводнике, кроме самого проводника и магнита, нужно еще движение. Электродвижущая сила на концах проводника, а при замкнутой цепи и ток в нем, появляется, если проводник определенным образом двигать в магнитном поле (рис. 1.19). Это явление называется элек-

тромагнитной индукцией (в переводе на русский - электромагнитным наведением).

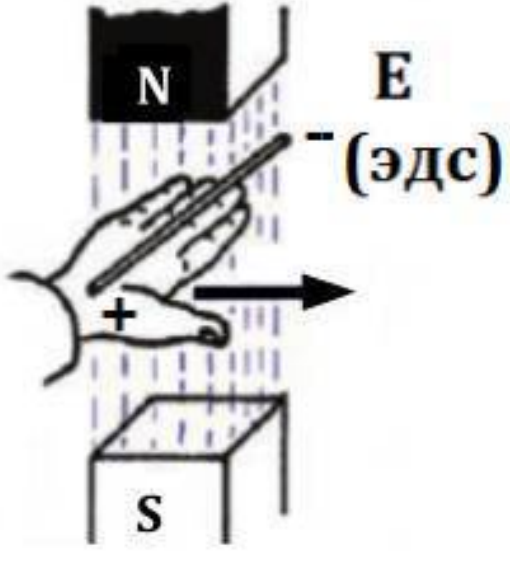


Рис. 1.19. Электромагнитная индукция

Появление индуцированной (наведенной) ЭДС в самом упрощенном виде можно объяснить так: каждый свободный электрон обладает магнитными свойствами в соответствии с законом Эрстеда, так как представляет собой элементарный электрический ток. Если поместить проводник во внеш-

нее магнитное поле, то оно "схватит" свободные электроны проводника, взаимодействуя с ними как с микроскопическими магнитиками. А если проводник после этого двинуть, то электроны как бы останутся на месте, удерживаемые магнитным полем, и проводник сместится относительно этих свободных электронов. В итоге на одном конце проводника концентрация электронов увеличится, на другом - уменьшится. То есть на концах проводника появится скопление разноименных зарядов, а значит, ЭДС. Эта ЭДС называется электродвижущей силой самоиндукции. Если же проводник остановить, то электроны постепенно вернутся в свои старые районы и вновь равномерно распределятся в проводнике. При этом ЭДС, конечно же, исчезнет.

Индуктивность L (коэффициент самоиндукции) - основной электрический параметр катушки, который характеризует величину энергии, запасаемой катушкой при протекании по ней электрического тока. Чем больше индуктивность, тем больше энергии она запасает в своем магнитном поле. Индуктивность зависит от размеров каркаса, формы, числа витков, диаметра и марки провода, а также от формы и материала сердечника.

Чтобы увеличить наведенную ЭДС, достаточно увеличить длину проводника или просто вместо одиночного провода взять катушку с большим количеством витков. Если рядом с этой катушкой быстро двигать магнит, то вольтметр, подключенный к ней, будет отклоняться весьма заметно, сооб-

щая, что в катушке индуцировалась, т.е. навелась, некоторая ЭДС. ЭДС, наведенная в одном витке, невелика, но все витки, по сути дела, соединены последовательно, и все наведенные в них небольшие ЭДС суммируются. Катушка напоминает батарею из последовательно соединенных гальванических элементов (рис. 1.18).

Также ЭДС самоиндукции увеличивается при увеличении скорости изменения магнитного поля и при размещении внутри катушки сердечников, например, из стали или феррита.

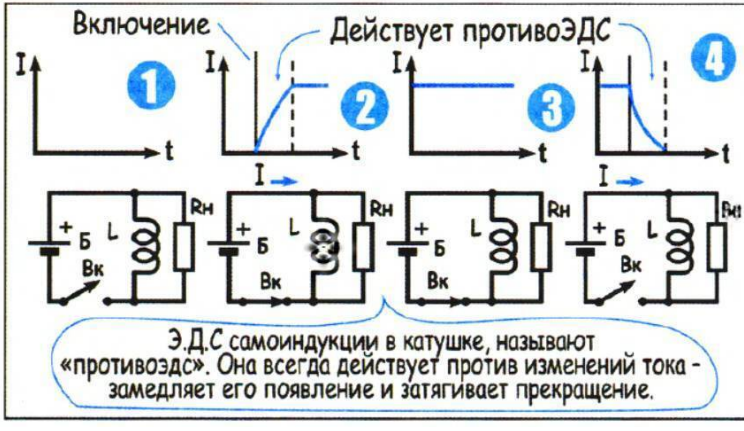


Рис. 1.20. Катушка: ЭДС и ток

Если, замкнув выключатель (рис. 1.20), мгновенно подать напряжение на катушку, ток в ней установится не сразу, он

будет нарастать постепенно. В катушке создается магнитное поле (в нем содержится полученная от тока энергия), которое влияет на силу тока и препятствует его изменению. Если ток в цепи исчезает, энергия созданного магнитного поля исчезает не сразу, а еще некоторое время поддерживает ток в цепи. Основное свойство индуктивности - препятствовать изменению в ней электрического тока, сначала при его появлении, а затем - при размыкании цепи. Ток увеличивается и уменьшается медленнее, чем в цепи без катушки.

В любом поле - гравитационном, электрическом, магнитном - всегда запасается энергия. На создание магнитного поля катушки, на создание в нем запасов энергии как раз и расходуется энергия батареи в момент включения. Именно поэтому ток резко не нарастает, он в первое мгновение тратит часть своей энергии на создание энергетических запасов в магнитном поле. А при выключении эти запасы возвращаются в электрическую цепь, поддерживая ток вместо уже отключенной батареи.

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 1.21. Катушка индуктивности L соединена последовательно с резистором R и при замыкании ключа S начинается ее намагничивание. Сначала ток в цепи равен нулю, а потом он начинает возрастать, причем, как вы уже знаете, не резко, а как показано на рис. 1.22. Он будет возрастать до тех пор, пока не достигнет своего максимального значения. Скорость изменения тока в цепи зависит от конкретных значений R и L. Время, необхо-

димое для того, чтобы сила тока достигла значения, равного 0,63 от его максимальной величины, называется постоянной времени цепи. Она равна L/R и получается в секундах, если L выразить в генри, а R - в омах.

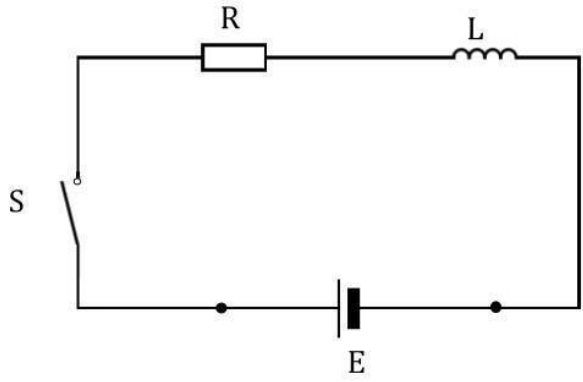


Рис. 1.21.

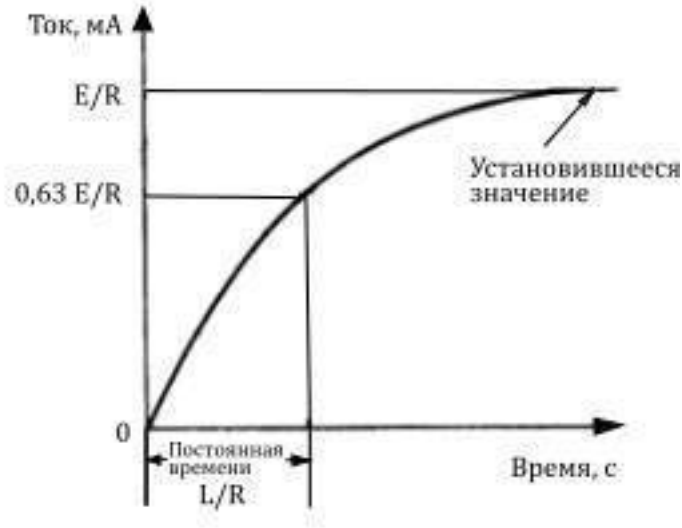


Рис. 1.22. Экспоненциальное увеличение тока, протекающего через катушку

Единицей измерения индуктивности является генри (Гн). Единица индуктивности названа так в честь американского физика Джозефа Генри (1797-1878). Генри - это такая индуктивность, которая требуется для индуцирования электродвижущей силы в 1 вольт при изменении тока в проводнике с скоростью 1 ампер в секунду. Генри - большая единица, обычно используются миллигенри (мГн) и микрогенри (мкГн).

Но в схемах, как правило, величину индуктивности не указывают, так как радиолюбителя интересует не эта величина, а количество витков провода в катушке, диаметр и марка провода, способ намотки и размеры каркаса катушки.

Как и в случае резисторов, общая индуктивность соединенных последовательно катушек L_1 и L_2 равна

$$L = L_1 + L_2$$

а для параллельно соединенных катушек она рассчитывается по формуле

$$1 / L = 1 / L_1 + 1 / L_2$$

Катушка индуктивности не препятствует протеканию постоянного тока, если, конечно, не принимать во внимание очень малое сопротивление провода, из которого она сделана. Следовательно, она имеет нулевое или очень малое сопротивление и может рассматриваться в цепи постоянного тока как короткое замыкание. Конденсатор же в связи с наличием в нем изолирующего диэлектрика имеет бесконечное или очень большое сопротивление и может рассматриваться в цепи постоянного тока как разрыв.

Глава 2. Переменный ток

Подобно тому, как батарейка создает на своих полюсах постоянное напряжение, генераторы на ГЭС и АЭС создают в сети переменное напряжение. В нашей бытовой сети оно составляет 220 В. Физический процесс, который означает, что по цепи идет переменный ток, заключается в том, что электроны двигаются то в одну сторону, то в другую (рис. 2.2).

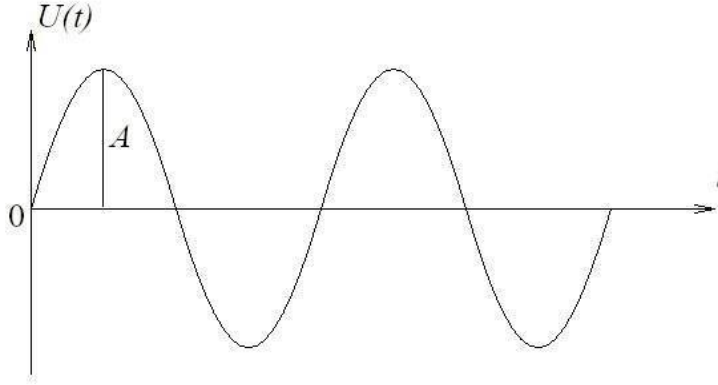


Рис. 2.1. Переменный ток

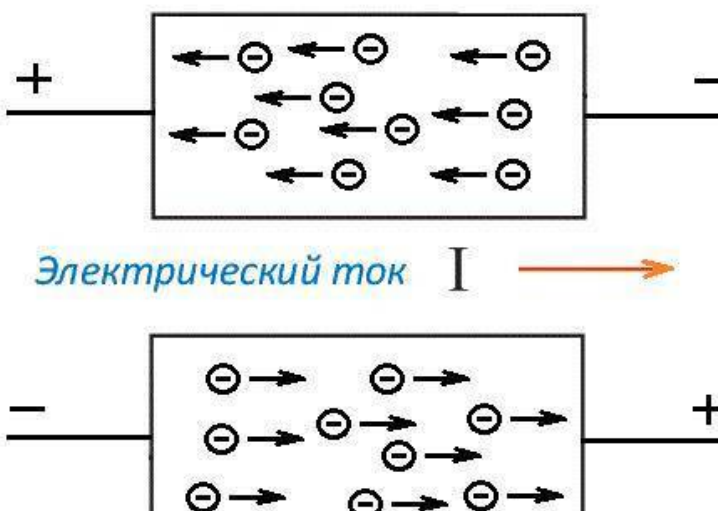


Рис. 2.2. Направление движения зарядов

Форма переменного тока или напряжения может принимать самые различные виды. Наиболее распространенной является синусоидальная форма переменного напряжения или тока (рис. 2.1). Одной из причин этого является простота его вырабатывания, а другой - то, что любой сигнал можно представить в виде суммы синусоид с разным периодом (или, что то же самое, в виде суммы сигналов синусоидального вида с разной частотой, рис. 2.20, 2.21).

Переменный ток легче генерировать и передавать на большие расстояния. Генераторы переменного тока проще и более экономичны в работе. Напряжение переменного тока может быть увеличено или уменьшено с помощью трансформатора с очень малой потерей мощности. Кроме того, переменный ток легко преобразуется в постоянный. Переменный ток можно использовать для передачи информации из одного пункта в другой по линиям передачи, а также преобразовывать в электромагнитные волны и передавать и принимать с помощью антенн.

Математическое выражение, описывающее синусоидальное напряжение, имеет вид

$U = A \cdot \sin 2\pi ft,$

где A - амплитуда, f - частота в герцах (периодах в секунду). Это же выражение можно написать через угловую частоту $\omega = 2\pi f$:

$U = A \cdot \sin \omega t$

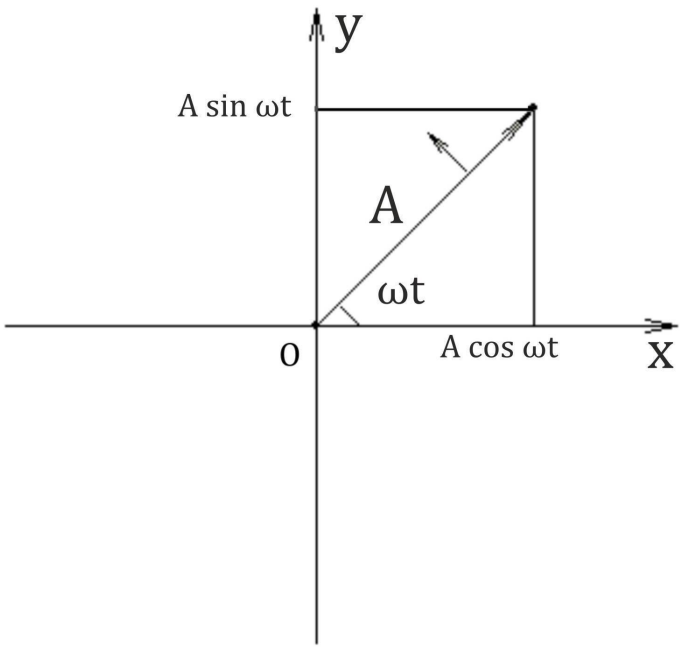


Рис. 2.3. Отражение (проекция) переменного тока на ось y

Теперь внимательнее посмотрите на рис. 2.3. Мысленно начните вращать вектор длиной A, выходящий из центральной точки (0, 0), с частотой ω. Как будет меняться его вертикальная координата, которая в данном случае отражает зависимость от времени нашего напряжения U? Правильно, по закону синусоидальной функции $A \cdot \sin \omega t$. (См. также рис.

2.24, где изображен геометрический смысл функции синуса.)

Постоянный ток имеет постоянную величину и её можно использовать при вычислениях. Значение же переменного тока меняется во времени. Чтобы преодолеть эту трудность, ввели понятие эффективного значения переменного тока. Эффективное значение переменного тока - это такое значение постоянного тока, при протекании которого через сопротивление выделяется столько же тепла, что и при переменном токе. Эффективное значение синусоидального тока - это его среднеквадратичное значение, т.е.

$I_{эфф} = I_{max} * 0.707$

Аналогично для напряжения

$U_{эфф} = U_{max} * 0.707$ (рис. 2.4)

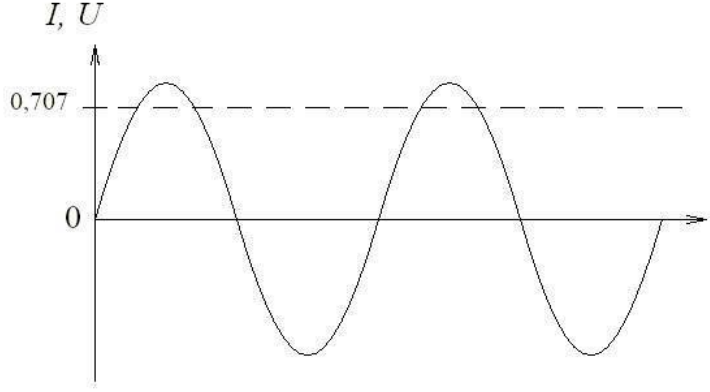


Рис. 2.4. Эффективное значение тока (напряжения)

Значения переменного тока и напряжения всегда задают в виде среднеквадратической величины, за исключением специально оговоренных случаев. Большинство измерительных приборов проградуировано в эффективных значениях тока и напряжения. 220 В - это эффективное значение переменного напряжения в электрической сети.

2.1. Резистор в цепи переменного тока (активное сопротивление)

Резисторы, которые мы изучали в первой части "Постоянный ток", - активные элементы, то есть такие, которые уменьшают ток в цепи, препятствуют движению зарядов и одновременно (это очень важно!) отбирают у них часть мощности на нагрев, выделение тепла.

У конденсаторов и катушек индуктивности поведение в цепи переменного тока несколько иное. Они оказывают сопротивление переменному току, но мощности при этом не отбирают. О них говорят, что они имеют реактивное сопротивление.

Процессы на участке с активным сопротивлением подчиняются закону Ома в том виде, в каком он был установлен для постоянного тока. Поэтому максимум тока наблюдается в тот же момент, что и максимум напряжения, то есть между током и напряжением никакого сдвига фаз нет (рис. 2.5).

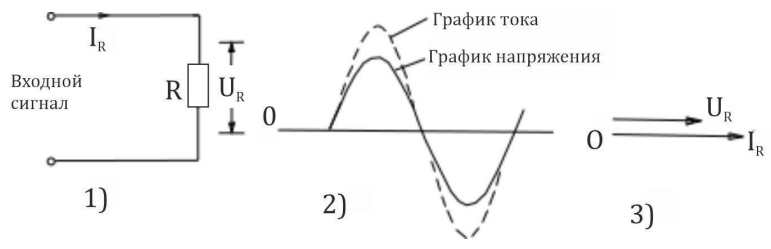


Рис. 2.5. Резистивная цепь

При включении в цепь конденсаторов и катушек индуктивностей между током и напряжением появляется сдвиг фаз. Рассмотрим их работу поподробнее.

2.2. Конденсатор в цепи переменного тока

Постоянный ток через конденсатор не проходит - в диэлектрике практически нет свободных зарядов, которые могли бы создавать ток, включение конденсатора в цепь постоянного тока равносильно разрыву этой цепи. Однако в момент, когда конденсатор заряжается или разряжается, ток в цепи идет - заряды идут к обкладкам или уходят с них. Такое движение зарядов будет происходить в цепи не только при включении-выключении, но и при любом изменении напряжения на конденсаторе. Увеличится напряжение - пойдут на обкладки дополнительные заряды и на какое-то мгновение появится зарядный ток в цепи. Уменьшится напряжение - и часть зарядов уйдет с обкладок, появится кратковременный разрядный ток, то есть ток обратного направления.

Нетрудно представить себе, что произойдет, если под-

вести к конденсатору переменное напряжение. Поскольку напряжение непрерывно меняется, то конденсатор будет непрерывно заряжаться и разряжаться, а значит, в цепи конденсатора будет непрерывно идти ток. Через диэлектрик заряды, как всегда, не проходят, они лишь двигаются к обкладкам конденсатора (напряжение на конденсаторе растёт, конденсатор заряжается) или с обкладок (напряжение на конденсаторе падает, конденсатор разряжается). Наибольший ток будет в те моменты, когда напряжение меняется с максимальной скоростью, то есть когда оно проходит через ноль. Во время достижения напряжением своей амплитуды ток становится равным нулю: какое-то мгновение напряжение не меняется - оно уже перестало расти, но еще не начало уменьшаться. Когда напряжение растет, мы считаем ток положительным, когда оно падает, направление тока меняется на обратное, и мы называем это направление отрицательным.

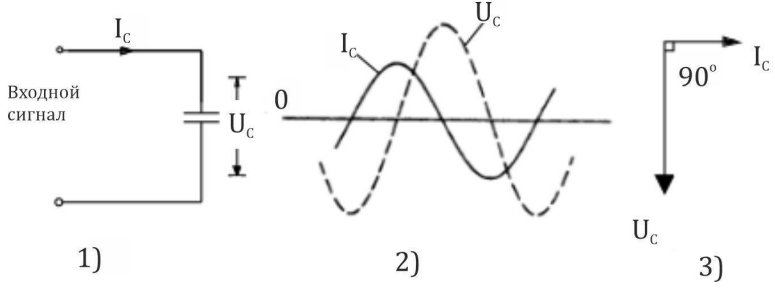


Рис. 2.6. Конденсатор: напряжение отстает от тока на 90°

Если к конденсатору подведено синусоидальное напряжение, то скорость его изменения - тоже синусоида, поэтому в цепи течет синусоидальный ток. Если построить эти два графика (рис. 2.6), то можно увидеть, что между этими синусоидами существует сдвиг фаз 90° (четверть периода), причем ток опережает напряжение. Это не нужно понимать так, будто ток появляется раньше, чем мы прикладываем напряжение; подобное невозможно. Просто сила тока достигает амплитуды на четверть периода раньше, чем напряжение.

Итак, мы выяснили, что если к конденсатору приложить переменное напряжение, то в цепи этого конденсатора пойдёт переменный ток. Причем сила тока может быть различной, она, в частности, зависит от ёмкости конденсатора C - чем больше C, тем больше ток (при одном и том же напряжении), поскольку в цепи при заряде и разряде конденсатора движется больше зарядов.

То, что конденсатор влияет на величину переменного тока в цепи, чем-то напоминает нам закон Ома, где ток зависит от сопротивления цепи R. Поэтому конденсатор, который постоянный ток не пропускает, в цепи переменного тока обладает некоторым ёмкостным сопротивлением, которое обозначают X_C. Зависит оно от ёмкости конденсатора C и от частоты f переменного тока. От ёмкости C оно зависит потому, что с её увеличением конденсатор может принять на свои обкладки больше зарядов, и поэтому больше будут за-

рядный и разрядный токи. А раз ток увеличивается, то, значит, по закону Ома сопротивление, в данном случае ёмкостное, уменьшается. Отсюда вывод: ёмкостное сопротивление X_c обратно пропорционально емкости - чем больше емкость, тем оно меньше.

Величина тока зависит ещё и от того, с какой скоростью меняется напряжение, т.е. от частоты. Чем больше эта скорость (чем выше частота f), тем больше зарядов за одну секунду приходит на обкладки конденсатора и уходит с них, тем, следовательно, больше ток, а значит, меньше ёмкостное сопротивление X_c. Оно вычисляется по следующей формуле:

$X_c = 1/(\omega \cdot C)$, где $\omega = 2\pi f$.

Однако между активным сопротивлением R и ёмкостным X_c есть принципиальное различие: ёмкостное сопротивление хоть и влияет на ток в цепи, но никакой мощности от источника питания не потребляет. В какие-то моменты, правда, источник затрачивает усилия на то, чтобы зарядить конденсатор, но конденсатор во время разряда честно возвращает полученную энергию. Этим он очень напоминает пружину, которая всё, что берёт при сжимании, то и отдаёт, распрямляясь. Чтобы отметить эту особенность ёмкостного сопротивления, его, в отличие от активного R (в котором энергия тратится на выделение тепла), называют реактивным сопротивлением.

2.3. Индуктивность в цепи переменного тока

По своей сути индуктивность обладает электрической инерцией, поскольку ее основное свойство состоит в том, чтобы препятствовать всякому изменению протекающего тока. Если через катушку пропускать некоторый переменный ток, то ее индуктивность будет противодействовать как уменьшению, так и увеличению протекающего тока.

То, что по катушке индуктивности пойдёт переменный ток, если подвести к ней переменное напряжение, не вызывает никаких сомнений - на катушку намотан металлический провод, а ток идет по любому проводнику. В подтверждение мы можем показать, как через катушку идёт постоянный ток, например, от гальванического элемента. Однако то, что происходит в цепи катушки при переменном токе, определяется не только сопротивлением проводника, из которого эта катушка изготовлена.

Вспомните, если в катушке меняется ток, на ней наводится ЭДС самоиндукции, которая тем больше, чем выше скорость изменения тока (закон Фарадея: $E_L = - L \cdot dI/dt$). По второму правилу Кирхгофа $U + E_L = 0$ или $U = - E_L = L\, dI/dt$.

Построим синусоиды тока и напряжения на одном графике:

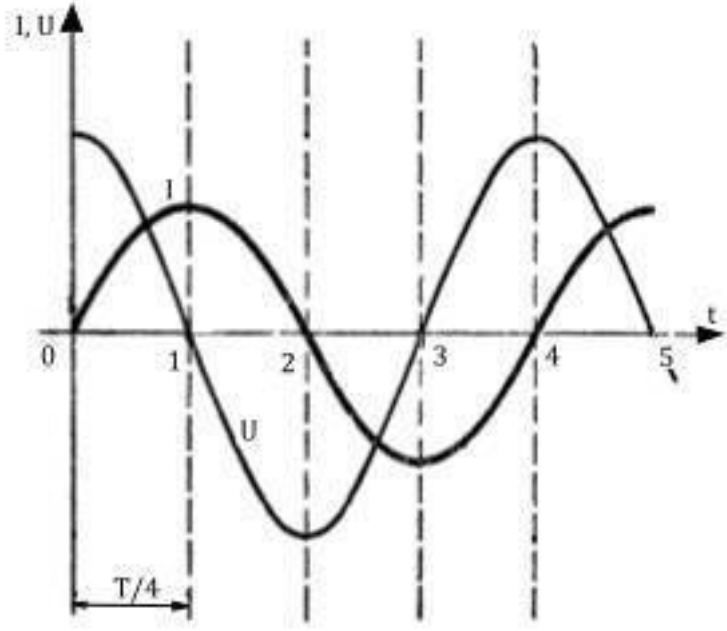


Рис. 2.7.

Видно, что ток и напряжение сдвинуты по фазе друг относительно друга на $\pi/2$ (на 90°).



Рис. 2.8.

Попробуем рассмотреть процесс с точки зрения физики. С момента t = 0 (участок 0-1) ток начал быстро возрастать, но по мере приближения к максимальному значению скорость нарастания тока уменьшалась (см. рис. 2.8, видно, что приращения за одинаковое время уменьшаются). В момент t = T/4 (точка 1), когда ток достиг максимальной величины, ско-

рость его изменения на мгновение стала равной нулю, т.е. изменение тока прекратилось. Затем ток начал сначала медленно, а потом быстро убывать и по истечении второй четверти периода (участок 1-2) уменьшился до нуля. А скорость изменения тока за эту четверть периода, возрастая от нуля, достигнет максимальной величины, когда ток станет равным нулю. А что касается направления, то в момент t = T/4 знак ЭДС самоиндукции меняется, поскольку ток начинает убывать (ЭДС - производная тока; производная функции в математике показывает скорость изменения значения этой функции), а до этого возрастал (как мы знаем, производная положительна при возрастании функции и отрицательна при убывании функции).

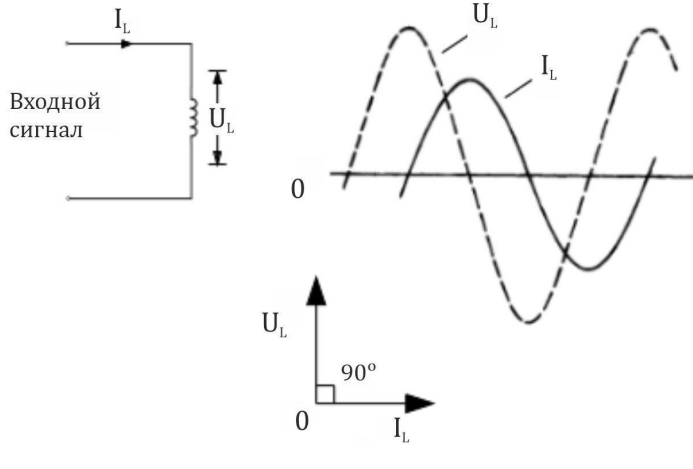


Рис. 2.9. Индуктивность: напряжение опережает ток на 90°

Сопротивление, оказываемое току катушкой индуктивности, равно

$X_L = \omega L$.

Как и конденсатор, катушка энергии у источника питания не потребляет. Всё, что в какие-то моменты катушка отбирает у источника на создание магнитного поля, она отдает в цепь обратно, когда это поле исчезает. И происходит такое "беру-отдаю" много раз в течение секунды (в зависимости от частоты). Чтобы отметить эту особенность индуктивного сопротивления, его, в отличие от активного R (в котором энергия тратится на выделение тепла), называют реактивным сопротивлением (как и конденсатор).

Если схема состоит только из резисторов, то последовательно включенные сопротивления просто суммируются. В случае же конденсаторов и катушек индуктивности так делать нельзя, так как, как мы сказали, это реактивные элементы, т.е. не потребляющие энергии источника питания. Напряжение на резисторе (активном элементе) совпадает по фазе с током, а в случае реактивных элементов это не выполняется. Напряжение на емкости отстает от тока на 90°, а в случае катушки напряжение опережает ток на те же 90°. Как это учитывать? Каким будет общее напряжение в случае цепи из сопротивления резистора и конденсатора или рези-

стора и катушки? А в случае, когда в схеме имеются все три элемента? Какая мощность будет циркулировать в цепи и какая мощность будет выделяться на активной части схемы, т.е. на резисторах? Просто посчитать сумму активных и реактивных сопротивлений, не учитывая разницы в фазах, будет ошибкой.

Для того чтобы ответить на эти вопросы, в электронике применяют такое математическое понятие, как комплексные числа. Поэтому прежде чем изучать переменный ток дальше, нам придется сделать небольшой экскурс в математику, но поверьте - эти усилия не пропадут даром.

Отступление: что такое комплексные числа

Вы наверняка сталкивались в школе с квадратными уравнениями, у которых выражение ($b^2=4ac$) было меньше нуля и решить их было для вас затруднительной задачей. Но корни у таких уравнений всё-таки есть, они представляют собой комплексные числа. После того, как вы прочитаете эту вставку, вы сможете решить любое квадратное уравнение.

Для примера возьмем следующее: $x^2 + 3x + 8 = 0$

*Посчитаем корень из дискриминанта: sqrt(3^2 - 4*8) = sqrt(9 - 32) = sqrt(-23).*

Казалось бы, мы "приехали"... Но на самом деле существует число j (в математике оно обозначается как i, но этой буквой в электронике обозначают ток), которое называется ***мнимой единицей*** *и дает в квадрате -1. На плос-*

кости мнимые числа откладываются по вертикальной оси и мнимая единица находится в точке (0; 1) (вещественные числа, как обычно, откладываются по горизонтальной оси, они называются действительной или реальной составляющей):

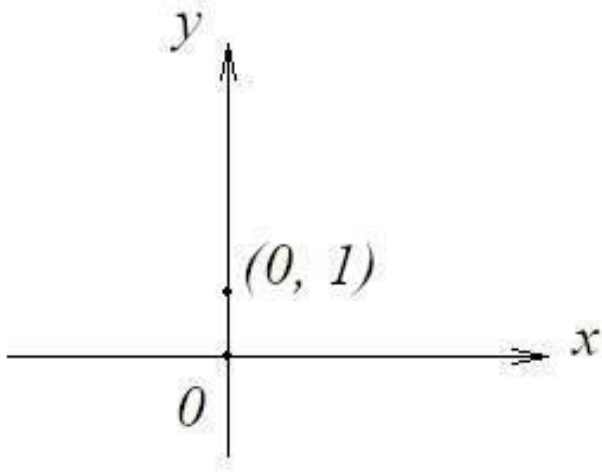


Рис. 2.10. *Мнимая единица j находится в точке (0, 1)*

Для того, чтобы посчитать, чему равен корень из нашего дискриминанта, разложим число на множители, одним из которых будет -1:

*sqrt(-1 * 23) = sqrt(-1) * sqrt(23) = j * sqrt(23).*

Теперь посчитаем корни уравнения:

$x_1 = (-3 + j * sqrt(23)) / 2 = -1.5 + j * 2.4$

$x_2 = (-3 - j * sqrt(23)) / 2 = -1.5 - j * 2.4$

Проверим, что эти числа являются корнями нашего уравнения (но мы округлили до десятых sqrt(23), поэтому будет погрешность). Подставим сначала первое число (мы помним, что мнимая единица j дает в квадрате -1):

$x^2 + 3x + 8 = (-1.5 + j*2.4)^2 + 3*(-1.5 + j*2.4) + 8 = 2.25 - j*7.2 + (j)^2 * 5.76 - 4.5 + j*7.2 + 8 = 2.25 - j*7.2 - 5.76 - 4.5 + j*7.2 + 8 = -8.01 + 8 = -0.01$

Теперь подставим второе число:

$x^2 + 3x + 8 = (-1.5 - j*2.4)^2 + 3*(-1.5 - j*2.4) + 8 = 2.25 + j*7.2 + (j)^2 * 5.76 - 4.5 - j*7.2 + 8 = 2.25 + j*7.2 - 5.76 - 4.5 - j*7.2 + 8 = -8.01 + 8 = -0.01$

Мы получили то, что ожидали (о том, что будет погрешность, мы упомянули). Посмотрим, где находятся корни на плоскости. Геометрически каждое комплексное число изображается точкой, имеющей координаты x и y. В нашем случае первая точка - это (-1.5; 2.4), вторая - (-1.5; -2.4):

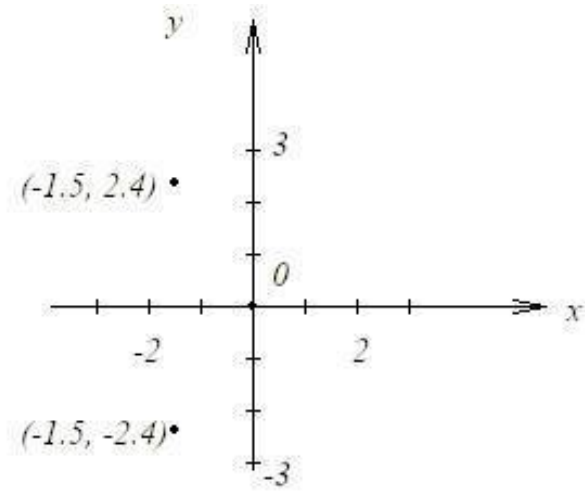


Рис. 2.11. *Корни квадратного уравнения*

Теперь вы сможете решить любое квадратное уравнение.

Таким образом, любое комплексное число можно представить в виде

$z = x + j \cdot y,$

где x и y - действительные числа, а j - мнимая единица. x называется действительной частью комплексного числа, а y - его мнимой частью. Обычные числа - это частный случай комплексных чисел, когда мнимая часть равна нулю:

$7 = 7 + j \cdot 0$

$32 = 32 + j \cdot 0$

Числа с нулевой действительной частью (например, 0 +

$j \cdot 6$ или $0 + j \cdot 23$) называют чисто мнимыми.

Также комплексное число можно представить в виде

$$z = x + j \cdot y = r \cdot \cos\varphi + j \cdot r \cdot \sin\varphi = r \cdot e^{j\varphi},$$

где

$r = \mathrm{sqrt}(x^2 + y^2)$ *- модуль комплексного числа*

$\varphi = \mathrm{arctg}(y/x)$ *- его аргумент*

Это станет гораздо понятнее, если вы посмотрите на плоскость, где изображено комплексное число, и вникните в геометрический смысл этих значений (рис. 2.12):

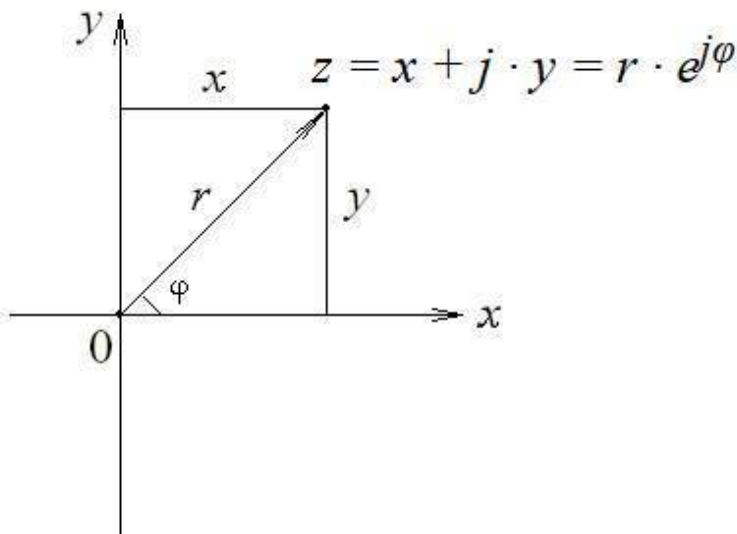


Рис. 2.12. *Отображение комплексного числа $z = x + j \cdot y$ на плоскости*

Отсюда видно, что модуль r - это расстояние от точки (x, y), отображающей данное число, до начала координат, а φ - угол наклона отрезка, соединяющего их, к оси x (этот угол называется аргументом).

И напоследок - о сопряженных числах. Два комплексных числа, отличающихся знаком мнимой части, называются сопряженными:

A1 = 3 + 4j

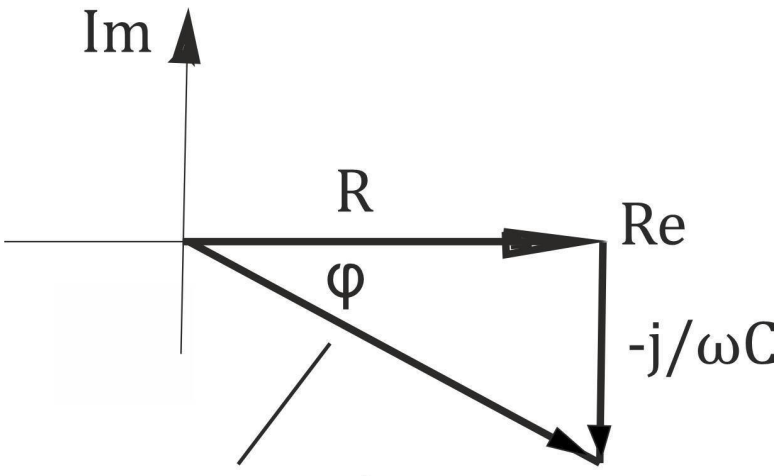
A2 = 3 - 4j

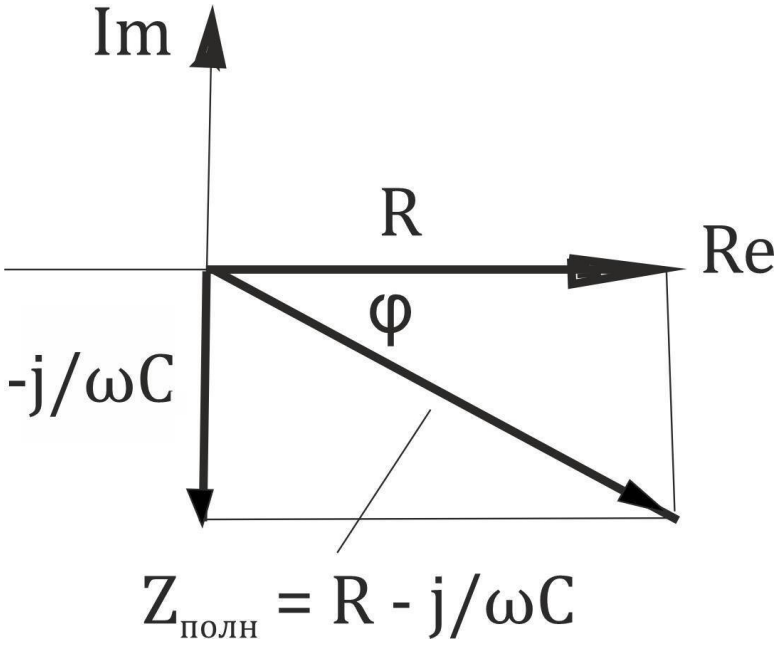
Их произведение не содержит мнимой части и равно квадрату модуля:

A1 · A2 = (3 + 4j) · (3 - 4j) = 25

(модуль здесь равен √(9 + 16) = √(25) = 5).

И последнее. Иногда при описании процессов, происходящих в схемах с реактивными элементами, вместо комплексного числа используют вектор. Это по сути одно и тоже, т.к. комплексному числу соответствует вектор, проведенный из начала координат в данную точку. Далее при суммировании сопротивлений у комплексных чисел попарно складываются действительные и мнимые части, а в случае векторов - векторы, соответствующие прооекциям векторов на оси. Векторы складывают либо по правилу треугольника (ниже первый рисунок), либо по правилу параллелограмма (второй рисунок). Это одно и то же, результат одинаковый:

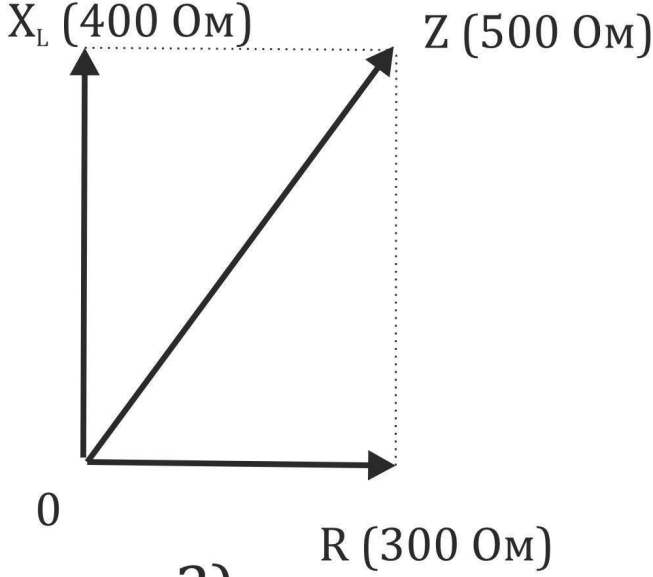

Im
R
Re
φ
-j/ωC
$Z_{полн} = R - j/\omega C$



Импеданс



1)



2)

Рис. 2.13. (1) Катушка индуктивности, соединенная последовательно с резистором R. (2) Векторное представление R, X_L и их суммы Z

Результирующее сопротивление цепи, содержащей как активное, так и реактивное (индуктивное или емкостное) сопротивление, называется импедансом или полным сопротивлением цепи.

Импеданс Z является векторной суммой реактивного сопротивления X и активного сопротивления R.

Рассмотрим, например, схему, изображенную на рис. 2.13, 1. Она включает в себя индуктивное сопротивление X_L, соединенное последовательно с резистором R. Из рис. 2.13, 2 видно, что вектор X_L опережает вектор R на 90°. (Вращение вектора означает увеличение угла φ (рис. 2.12), оно осуществляется против часовой стрелки, начало (т.е. нулевое значение этого угла) - это горизонтальная ось. А проекции этого вектора на оси - это активное (на ось x) и реактивное (на ось y) составляющие полного сопротивления Z.) Импеданс равен

$$Z = \sqrt{(X_L^2 + R^2)}.$$

Если $X_L = 400$ Ом и $R = 300$ Ом, то

$$Z = \sqrt{(16 \cdot 10^4 + 9 \cdot 10^4)} = \sqrt{(25 \cdot 10^4)} = 500 \text{ Ом}.$$

Чтобы лучше понять, как работать с комплексными числами (или векторами), соответствующими сопротивлениям резистора, конденсатора и катушки индуктивности, рас-

смотрим несколько примеров.

Пример 1

Нарисовать векторную диаграмму для RL-цепи, изображенной на рис. 2.14, 1, и найти напряжение U_T, приложенное к схеме.

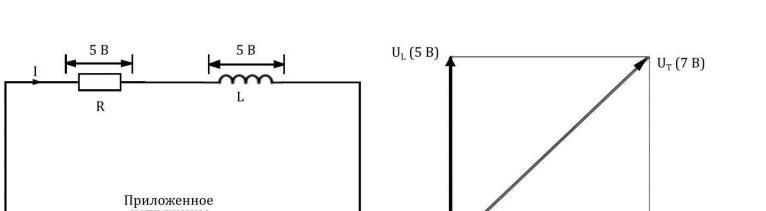


Рис. 2.14.

Решение:

Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 2.14, 2. Сначала построим вектор тока I. Напряжение U_R находится в фазе с током I (т.к. это резистор), а напряжение U_L опережает ток I (а значит, и U_R) на 90°. Суммарное напряжение U_T, приложенное к цепи, равно векторной сумме U_R и U_L. По теореме Пифагора U_T равно:

$$U_T = \sqrt{(U_R^2 + U_L^2)} = \sqrt{(25 + 25)} = \sqrt{50} \approx 7 \text{ В}.$$

Здесь следует заметить, что полученный результат больше, чем каждая из составляющих, но меньше их суммы, поскольку это гипотенуза прямоугольного треугольника, а на-

пряжения на элементах цепи (U_R и U_L) - его катеты. Угол между вектором приложенного напряжения и током равен $\theta = 45°$.

Пример 2

Для RC-цепи, изображенной на рис. 2.15, 1, начертить векторную диаграмму и найти напряжение U_T, приложенное к схеме.

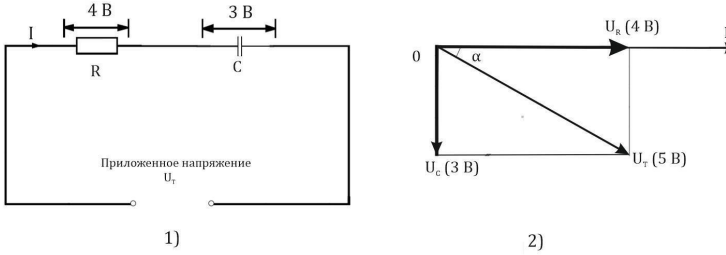


Рис. 2.15.

Решение:

На векторной диаграмме, показанной на рис. 2.15, 2, видно, что U_C отстает от тока (и от U_R) на 90°. U_T является векторной суммой U_R и U_C. Также видно, что U_T больше, чем каждая из составляющих напряжения, т.е. больше, чем 4 В, но меньше, чем их арифметическая сумма (3 + 4 = 7 В). По теореме Пифагора напряжение равно $U_T = 5$ В и отстает от тока на угол $\alpha = 36°$.

Пример 3

Для RLC-цепи, изображенной на рис. 2.16, 1, начертить полную векторную диаграмму и найти напряжение U_T, приложенное к схеме.

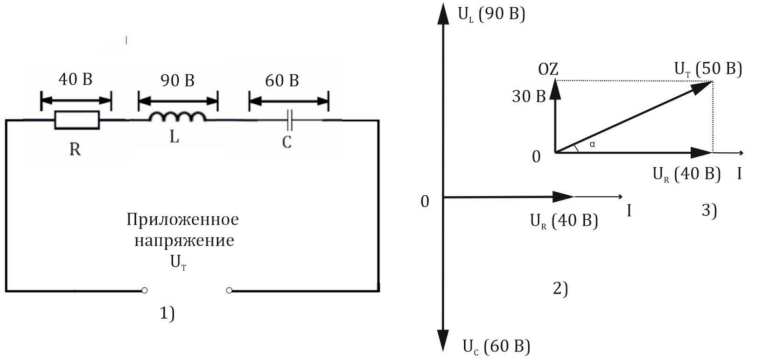


Рис. 2.16.

Решение:

Векторная диаграмма построена на рис. 2.16, 2. U_R находится в фазе с током I, опережает U_C на 90° и отстаёт от U_L на 90°. Поскольку U_L и U_C лежат на одной вертикальной прямой, то их сумма, как показано на рис. 2.16, 3, может быть представлена вектором

$OZ = U_L - U_C = 90 - 60 = 30$ В.

Результирующее напряжение U_T равно векторной сумме

U_R и OZ. $U_T = 50$ В и опережает вектор тока на угол $\alpha = 36°$.

Из этих примеров видно, что в случае переменного тока реактивные сопротивления просто складывать для получения итогового результата нельзя, сумма катетов - это не гипотенуза.

Теперь у нас есть багаж знаний по математике, чтобы разбираться в схемах, состоящих из резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. (После этого займемся полупроводниками и узнаем, как работают диоды, транзисторы и т. д.)

2.4. Сигналы

Изменения тока или напряжения во времени можно представить в виде различных графиков. Постоянный ток, как вы знаете, отображается прямой линией (рис. 2.17, 1), а переменный ток можно изобразить самыми различными кривыми. Форма кривой переменного тока отражает периодические изменения значения тока от максимального к минимальному, затем опять к максимальному и т.д. (рис. 2.17, 2). Несколько таких кривых изображены на рис. 2.18.

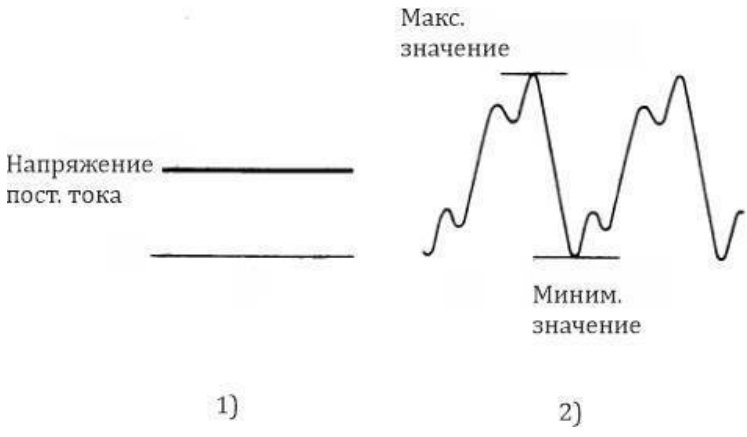


Рис. 2.17. Графики постоянного (1) и переменного (2) тока

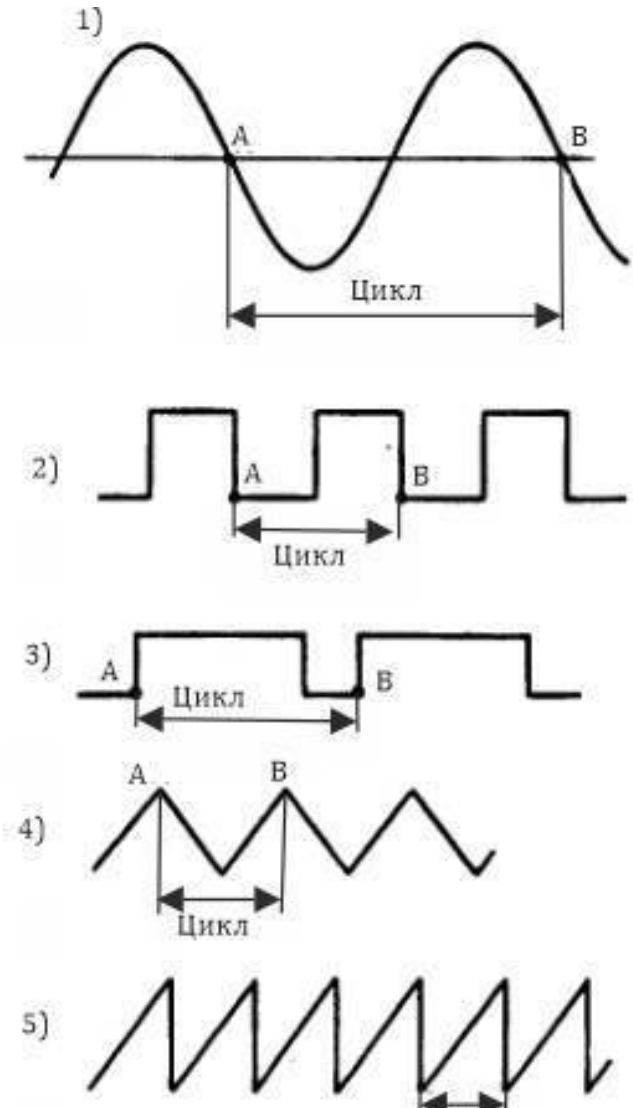

1)
A
B
Цикл
2)
A
B
Цикл
3)
A
B
Цикл
4)
A
B
Цикл
5)

Рис. 2.18. Типы кривых переменного тока: синусоида (1), меандр (2), прямоугольный (3),

треугольный (4), пилообразный (5), импульсы (6)

Повторяющаяся часть сигнала переменного тока называется циклом сигнала. На кривых, изображенных на рис. 2.18 точка А является началом цикла, а точка В - его концом и началом следующего цикла. Длительность цикла называется периодом.

Количество циклов сигнала в единицу времени называется частотой сигнала. Единица измерения частоты - герц (Гц). Например, если цикл изменения сигнала повторяется один раз в секунду, то частота сигнала равна 1 Гц, если 10 раз - 10 Гц и т.д. (рис. 2.19). Нетрудно догадаться, что частота сигнала и его период - две взаимно обратные величины:

$f = 1 / T$,

где f - частота в герцах, T - период в секундах.

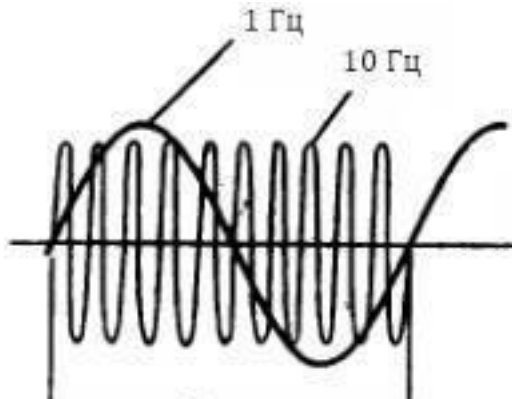


Рис. 2.19. Сигналы различных частот

Сигналы, изображенные на рис. 2.18 (и не только такие, а вообще любой формы с повторяющимся периодом), можно получить как сумму синусоидальных сигналов разной частоты и амплитуды. Такие составляющие называются гармониками. Математически разложение сигнала на гармоники можно представить в виде:

$a(t) = A_0 + A_1*\sin \omega t + A_2*\sin 2\omega t + A_3*\sin 3\omega t + A_4*\sin 4\omega t + ...$

Эта сумма называется рядом Фурье.

Сигнал с частотой $\omega = 2\pi f$ называется первой, или основной, гармоникой, сигнал с частотой 2ω - второй гармоникой, с частотой 3ω - третьей и т.д.

Чем больше здесь слагаемых, тем точнее этой суммой выражается моделируемый сигнал.

Прямоугольный сигнал содержит основную гармонику плюс нечетные гармоники. Например, прямоугольный сигнал частотой 1 кГц состоит из

- основной гармоники с частотой 1 кГц,
- 3-ей гармоники с частотой 3 кГц,
- 5-ой гармоники с частотой 5 кГц,
- 7-ой гармоники с частотой 7 кГц,

и т.д.

На рис. 2.20 изображено разложение на основную и третью гармоники прямоугольного сигнала.



Рис. 2.20. Аппроксимация прямоугольного сигнала

Пилообразный сигнал содержит основную гармонику плюс четные гармоники. Например, пилообразный сигнал частотой 1 кГц состоит из

- основной гармоники с частотой 1 кГц,
- 2-ой гармоники с частотой 2 кГц,
- 4-ой гармоники с частотой 4 кГц,
- 6-ой гармоники с частотой 6 кГц,

и т.д.

На рис. 2.21 изображено разложение на основную и вторую гармоники пилообразного сигнала.



Рис. 2.21. Аппроксимация пилообразного сигнала

Необходимо также понимать, что это справедливо только

для сигналов с повторяющимся периодом. Если он меняется, то сумма гармоник тоже меняется.

Сигналы, которые должны пропускать, например, усилители звуковых частот, которые есть в приемниках и музыкальных центрах или в виде отдельных устройств, например, в студиях, должны доходить до выхода без искажений. Поскольку в разные моменты времени это сумма разных гармоник, усилители должны без искажений усиливать все гармоники звукового диапазона (это частоты от 20 Гц до 20 кГц). Создание широкой полосы пропускания - одна из важных задач для инженеров при проектировании схем этих устройств. А на вход приемников, если говорить о высокочастотных диапазонах принимаемых волн (например, для FM это диапазон от 86 до 108 МГц), наоборот, должна поступать очень узкая полоса с частотой радиостанции, на которую произведена настройка. Создание качественных фильтров высокой частоты - тоже задача радиоинженеров.

Природа любого сигнала - это составляющие его гармоники, т.е. "сразу" сложного сигнала родиться не может, от радиостанций, спутников, сотовых вышек и самих сотовых телефонов распространяются высокочастотные гармоники.

2.5. RC-цепи: изменение во времени напряжения и тока

2.5.1. Дифференциатор

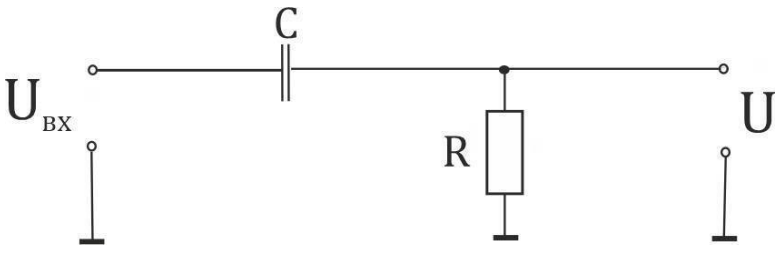


Рис. 2.22. Дифференциатор

При поступлении на вход сигнала конденсатор (через резистор) начинает заряжаться (т.е. на его обкладках появляются заряды), причем чем меньше сопротивление резистора, тем быстрее это происходит. А поскольку конденсатор заряжается, по цепи идет ток, причем чем быстрее меняется напряжение на конденсаторе (быстрее происходит зарядка конденсатора), тем этот ток больше:

$I = C * \Delta U / \Delta t$ (*)

Если входное напряжение меняться перестало, количество зарядов на обкладках конденсатора достигло некоторого уровня и дальше оно не меняется, движение зарядов по цепи приостанавливается, процесс зарядки прекращается, ток в цепи протекать перестает. Ток в цепи конденсатора - это не ток через изолятор (!), который находится между пластинами, а процесс его зарядки и разрядки (!), которые чередуются при изменениях входного напряжения.

Чем быстрее меняется входное напряжение дифференциатора, тем быстрее заряжается конденсатор (в данном случае

это происходит через резистор, но сути это не меняет), а значит больше ток, который при этой зарядке появляется.

Зачем в данной схеме нужен резистор? Ведь вроде бы он только мешает конденсатору заряжаться и увеличивает потери входного сигнала? Резистор в данной схеме нужен для того, чтобы получить итоговый сигнал (напряжение) на выходе, т.к. напряжение на нем по форме совпадает с током заряда/разряда конденсатора, поскольку резистор является активным элементом и формы напряжения и тока совпадают, а ток в соответствии с формулой (*) пропорционален производной от напряжения (производная от функции в математике – это скорость изменения этой функции).

Если бы резистора не было (выход был бы закорочен), мы бы не смогли получить выходной сигнал, т.к. напряжение можно получить только тогда, когда цепь не закорочена, а имеет некоторое сопротивление, на котором появляется сигнал такой же формы, как ток через него. А поскольку ток в цепи меняется в соответствии с формулой (*), т.е. пропорционален производной от входного напряжения, данная схема называется дифференциатором. Производная от функции - это отношение ее приращения ΔU к приращению аргумента Δt и чем меньше это приращение времени, тем точнее это является значением производной в данной точке. А если совсем точно, то производная - это тангенс угла наклона касательной.

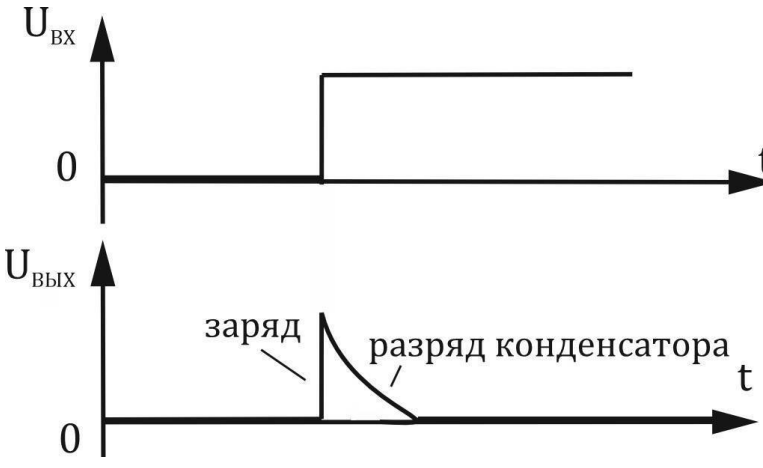


Рис. 2.23. Сигналы на входе и выходе дифференциатора

Если на наш сигнал (скачок напряжения на входе и короткий всплеск выходного напряжения) посмотреть с математической точки зрения, то мы получили производную от входного напряжения. В идеальном сигнале изменение уровня сигнала бесконечно короткое, поэтому и всплеск напряжения на выходе должен быть бесконечно большим. (Производная от бесконечно короткого скачка бесконечно велика, это тангенс прямого угла; на рис. 2.24 показан геометрический смысл тангенса.) Но идеальных сигналов не бывает, увеличение уровня напряжения на входе происходит в течение некоторого времени, а не мгновенно, поэтому и всплеск напряжения на выходе не будет бесконечно большим и ко-

ротким, сигнал будет увеличиваться в течение некоторого времени и до определенного значения, а затем вернется к прежнему значению (это разряд конденсатора). Кроме того, уровень сигнала в любой схеме ограничен напряжением источника питания.

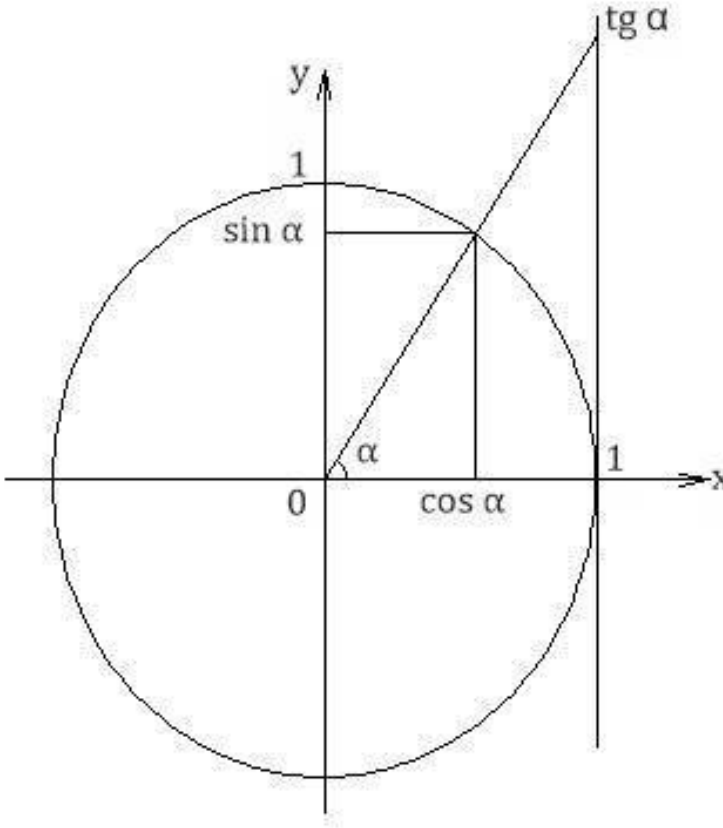


Рис. 2.24. Геометрический смысл тригонометрических функций

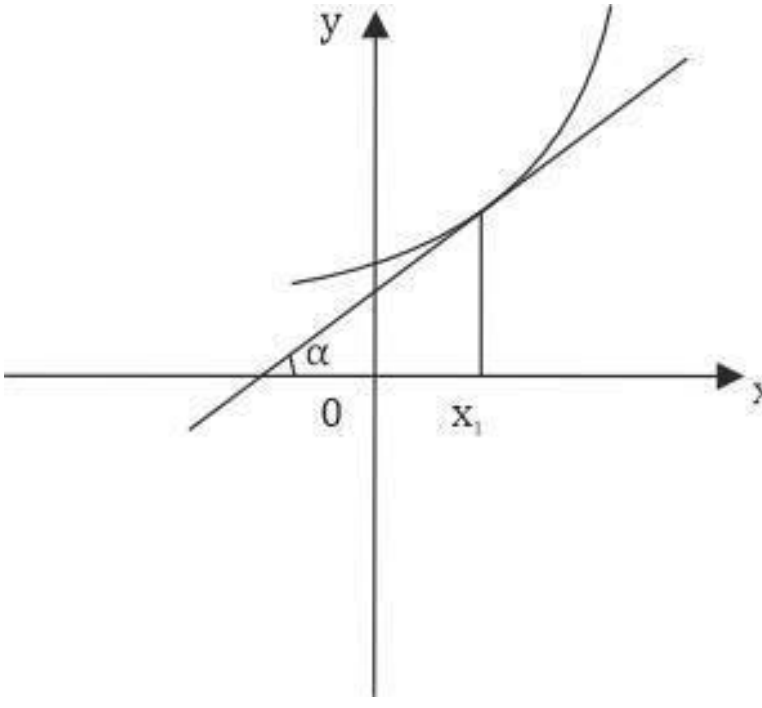


Рис. 2.25. Производная - тангенс угла α наклона касательной

Мы говорили о некотором коротком сигнале-скачке напряжения. Если же сигнал реальный, т.е. изменяющийся по формуле некоторой функции, на выходе мы получим производную от этой функции. Продолжительность всплесков на выходе зависит от значений емкости конденсатора и сопро-

тивления резистора, чем они больше, тем длиннее/плавнее будет всплеск, т.е. дифференцированный сигнал, на выходе. Как уже упоминалось, их произведение R·C называется постоянной времени.

При некотором скачке входного напряжения конденсатор начнет заряжаться и ток заряда будет тем больше, чем быстрее мы меняем входное напряжение ($I = C \cdot dU/dt$, формула, отражающая динамическое поведение конденсатора). В идеале при нулевом сопротивлении мы получили бы производную от входного сигнала ($I = C \cdot dU/dt$), т.е. это был бы идеальный дифференциатор. Но схем с нулевым сопротивлением на выходе не бывает, в реальности на выходе всегда должно быть какое-то сопротивление, чтобы получить сигнал ($U_{сиг} = I \cdot R$, поэтому сопротивление не должно равняться нулю), ведь не бывает так, что на выходе схемы находится проволока, с которой сигнал не снять.

Резистор своим сопротивлением вносит в дифференцирование входного сигнала погрешность, поэтому получается неидеальная производная, и чем больше сопротивление, тем больше сигнал становится не похожим на идеальную производную. Хотя резистор и вносит погрешность в форму производной, но благодаря ему на выходе появляется какое-то напряжение, т.к. через резистор начинает течь ток заряда конденсатора, который хоть и не является производной входного сигнала ($I = C \cdot dU/dt$), но очень похож на нее. Этот ток создает на выходном резисторе напряжение, которое по фор-

ме совпадает с этой производной, поскольку напряжение и ток связаны линейной зависимостью (U=I·R, закон Ома). Таким образом, выходное напряжение очень похоже на производную от входного напряжения.

Если вы поняли изложенный выше материал, то этого достаточно. Если же вам хочется покопаться в математическом описании данного процесса, то прочитайте следующие два абзаца.

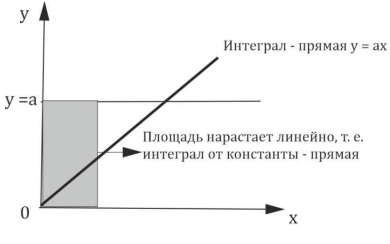
В соответствии с динамическим описанием поведения конденсатора ток в цепи равен $I = C \cdot dU_C/dt = C \cdot d(U_{вх} - U_{вых})/dt$ и одновременно (по закону Ома) $I = U_{вых} / R$. Ток через резистор и конденсатор течет один и тот же, поэтому мы можем приравнять правые части этих формул): $C \cdot d(U_{вх} - U_{вых})/dt = U_{вых}/R$ Если бы сопротивление резистора и емкость конденсатора были достаточно малыми и выполнялось условие $dU_{вых}/dt << dU_{вх}/dt$, (см. следующий абзац) мы могли бы записать, что $U_{вых}/R = C \cdot d(U_{вх})/dt$ или $U_{вых} = R \cdot C \cdot d(U_{вх})/dt$, т.е. чем больше скорость изменения входного сигнала, тем острее пик напряжения на выходе. Таким образом, на выходе мы получаем производную входного напряжения.

Для того чтобы выполнялось условие $dU_{вых}/dt << dU_{вх}/dt$, произведение R·C должно быть небольшим, но при этом сопротивление R не должно быть слишком малым, чтобы не нагружать вход (при скачке напряжения на входе изменение напряжения на конденсаторе равно нулю, т.к. зарядка C

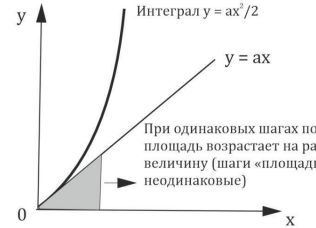
начинается не мгновенно и в этот (начальный) момент для входной цепи именно R является нагрузкой).

2.5.2. Интегратор

Для понимания этой темы вспомним геометрический смысл интеграла. Это нарастание площади при движении вдоль горизонтальной оси x. Например, в самом простом случае, когда функция равна постоянному значению, это линейная зависимость, т.е. возрастающая прямая (мы двигаемся вправо и при этом площадь под графиком нарастает одинаково быстро при одинаковых приращениях аргумента x, рис. 2.26, 1). А в случае, если у нас функция - не константа, а возрастающая прямая, то при разных значениях x и при приращениях x на одинаковую величину площадь увеличивается уже не одинаково, а чем дальше, тем сильнее. Поэтому интеграл от линейной функции - парабола, т. е. он пропорционален x^2 (рис. 2.26, 2).



1)



2)

Рис. 2.26. Что такое интеграл

А теперь рассмотрим схему, изображенную на рис. 2.27.

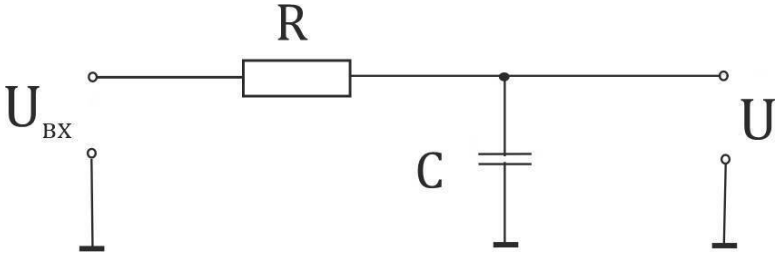


Рис. 2.27. Интегратор

Ток можно выразить следующим образом:

$I = C \cdot (dU/dt)$ (см. п. 1.4.1),

$I = (U_{вх} - U) / R$ (закон Ома).

Приравняем правые части:

$C \cdot (dU/dt) = (U_{вх} - U) / R$

Если обеспечить выполнение условия $U << U_{вх}$, то можно записать

$C \cdot (dU/dt) = U_{вх} / R$

$dU/dt = U_{вх}/RC$

$$U(t) = \int_0^t U_{вх}(t) \cdot dt \ / \ RC$$

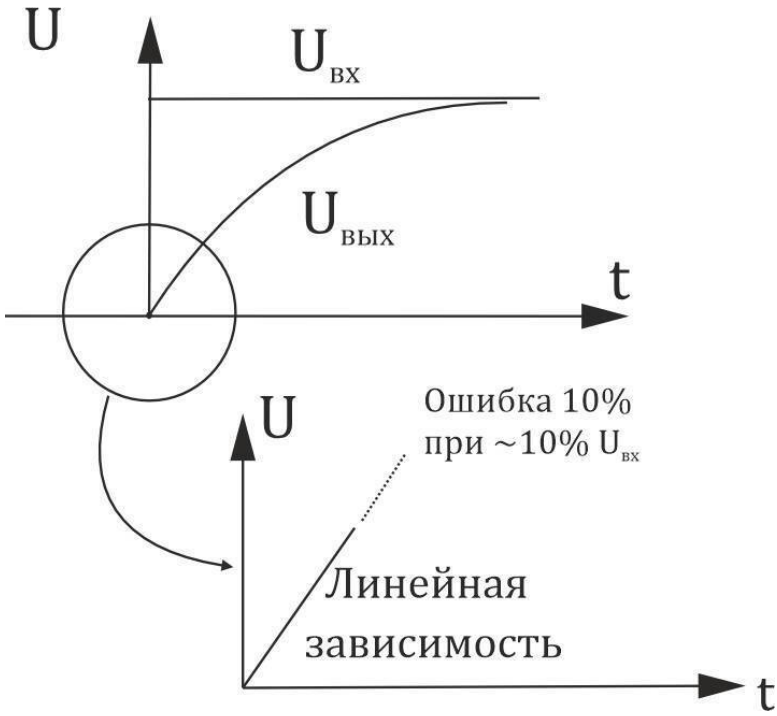


Рис. 2.28.

Видно, что выходное напряжение пропорционально интегралу от входного, поэтому такая RC-цепь называется интегрирующей. Рассмотрим, как эта схема обеспечивает аппроксимацию интегрирования в случае входного сигнала прямоугольной формы (рис. 2.28). Первый участок графика (интеграл от постоянной величины $U_{вх}$) - прямая с по-

чти постоянным углом наклона; при увеличении постоянной времени RC используется всё меньший участок зависимости $U_{вых}(t)$, тем самым обеспечивается лучшая аппроксимация идеального пилообразного сигнала.

Условие $U << U_{вх}$ равносильно большому значению сопротивления резистора R. На нем падает значительная доля входного напряжения, а значит значение выходного напряжения U мало и интегратор работает на почти прямом участке кривой U(t), описывающей заряд конденсатора. На практике этим приближением пользуются довольно часто.

Интегрирующие цепи находят широкое применение в аналоговой технике. Их используют в управляющих системах, схемах с обратной связью, при аналого-цифровом преобразовании и генерации колебаний.

Рассмотрим работу фильтра низких частот (ФНЧ) и фильтра высоких частот (ФВЧ), состоящих из резистора и конденсатора.

2.6. Фильтры

Перейдем к рассмотрению таких же схем из резистора и конденсатора, рассматривая сигналы в зависимости не от времени, а от частоты сигнала. Этот тип анализа называется анализом в частотной области или спектральным анализом (анализом сигнала с точки зрения составляющих его синусоид).

Благодаря тому, что импеданс конденсатора, равный $Z_C = -j/(\omega C)$, зависит от частоты, с помощью конденсаторов и

резисторов можно строить частотно-зависимые делители напряжения, которые будут пропускать только сигналы нужной полосы частот, а все остальные - подавлять.

2.6.1. Частотная характеристика

Если подключить к генератору сигналов два резистора, соединенных последовательно, то при изменении частоты вид графика сигнала меняться не будет, поскольку сопротивление, которое оказывают сигналу резисторы, от частоты не зависит - какая доля сигнала в зависимости от соотношения сопротивлений достанется резистору, такая и будет при любой частоте.

Но если один из резисторов заменить конденсатором или катушкой, то ситуация изменится, потому что у них сопротивление при изменении частоты меняется. График, который показывает поведение схемы в зависимости от частоты, называется частотной характеристикой. По вертикали у нее откладывается коэффициент передачи входного сигнала или просто выходное напряжение, а по горизонтальной оси - частота (см. ниже частотные характеристики фильтров ВЧ и НЧ).

2.6.2. Фильтр ВЧ

Фильтр ВЧ - делитель напряжения, верхним плечом которого является конденсатор (рис. 2.29). Мы знаем, что сопротивление конденсатора зависит от частоты и чем она больше, тем меньше это сопротивление ($X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi f C)$), оказываемое конденсатором сигналу. Для очень высоких ча-

стот это просто проволока, соединяющая вход и выход, поэтому такие сигналы почти без ослабления попадают на выход, а для низких - разрыв, т.е. они на выход не проходят. Поэтому данная схема пропускает только сигналы высоких частот, т.е. играет роль фильтра ВЧ.

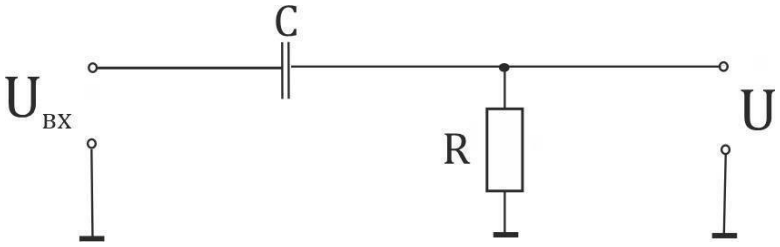


Рис. 2.29. Фильтр высоких частот

Найдем зависимость коэффициента передачи этой схемы от частоты. Согласно закону Ома для комплексных величин ток в цепи равен

$I_{вх} = U_{вх} / |Z_{полн}| = U_{вх} / \sqrt{(R^2 + 1 / (\omega^2 C^2))}$

(в знаменателе - длина гипотенузы (вектора) этого полного сопротивления (рис. 2.30))

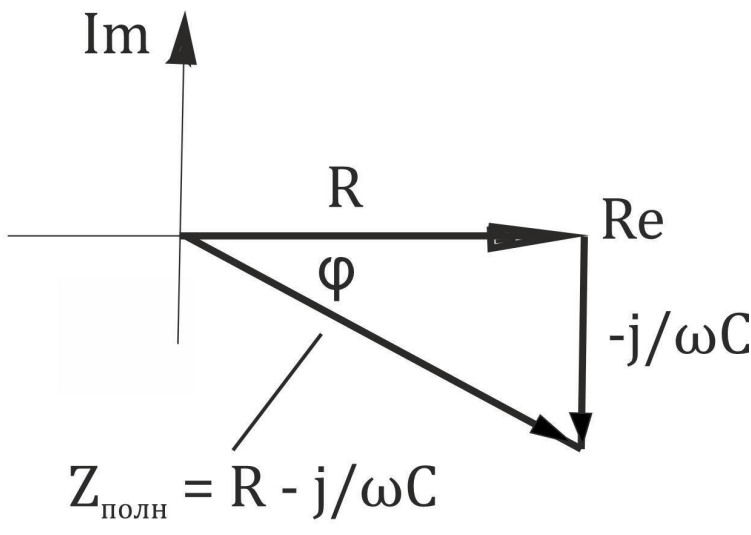


Рис. 2.30. Полное сопротивление фильтра

Умножая его на R, получаем амплитуду выходного напряжения:

$U_{вых} = I_{вх} \cdot R = U_{вх} R / \sqrt{(R^2 + 1 / \sqrt{(\omega^2 C^2)}} = U_{вх} \omega RC / \sqrt{(1 + (\omega RC)^2)} = U_{вх} 2\pi fRC / \sqrt{(1 + (2\pi fRC)^2)}$

График этой зависимости представлен на рис. 2.31.

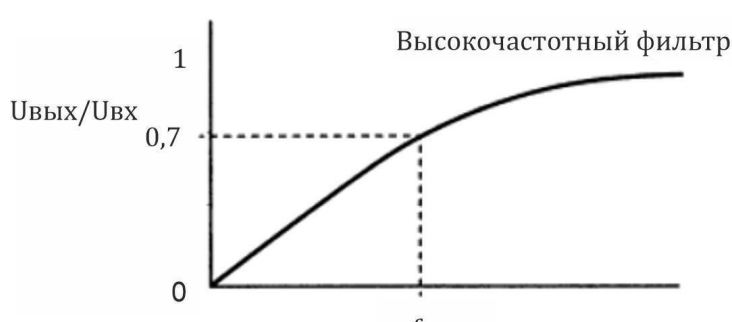


Рис. 2.31. Передаточная характеристика фильтра ВЧ

Точка, помеченная как $f_{3дБ}$, соответствует половине мощности исходного сигнала.

2.6.3. Фильтр НЧ

Фильтр НЧ - делитель, на выходе которого вместо резистора включен конденсатор (рис. 2.32). Сопротивление конденсатора зависит от частоты и чем она больше, тем меньше это сопротивление ($X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC)$). Значит чем она больше, тем меньше сопротивление, которое оказывает конденсатор сигналу. Для очень высоких частот это просто проволока, которая закорачивает выход, а для низких - разрыв, т.е. они не ослабляются. Поэтому данная схема пропускает только сигналы низких частот, т.е. играет роль фильтра НЧ.

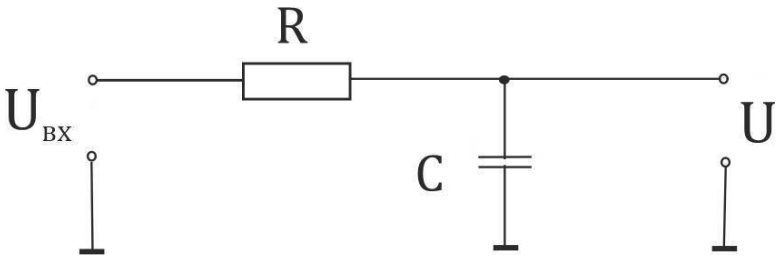


Рис. 2.32. Фильтр низких частот

В этом случае

$U_{вых} = U_{вх} / \sqrt{(1 + (\omega RC)^2)} = U_{вх} / \sqrt{(1 + (2\pi fRC)^2)}$

Его частотная характеристика изображена на рис. 2.33. Фильтры низких частот также широко используются в электронике. Например, их используют для устранения влияния близлежащих радио- и телевизионных станций на работу усилителей звуковой частоты и других чувствительных электронных приборов.

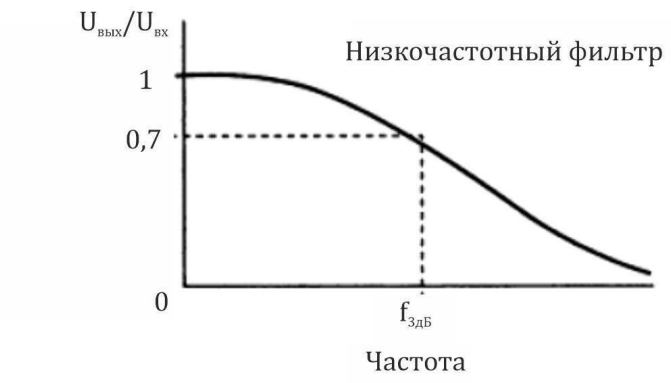


Рис. 2.33. Частотная характеристика фильтра низких частот

2.7. Резонанс

2.7.1. Последовательный контур

Попробуем подключить к последовательной LCR-цепи генератор с изменяемой частотой и будем постепенно увеличивать частоту его сигнала. При этом индуктивное сопротивление будет возрастать, а емкостное - уменьшаться (рис. 2.34, 4). На какой то частоте (назовем ее резонансной частотой) сопротивления X_L и X_C станут равными, а значит, уравняются напряжения на них U_L и U_C. А так как эти напряжения противофазны, то они полностью скомпенсируют друг друга, и генератор перестанет чувствовать наличие катушки и конденсатора, перестанет отдавать им часть своей

ЭДС. Общее сопротивление цепи (импеданс) резко уменьшится, для генератора из всей цепи останется только одно активное сопротивление R, ток I из-за этого резко возрастет (рис. 2.34, 6), и столь же резко увеличатся напряжения U_L и U_C. Но заметьте, что увеличится каждое в отдельности, а общее суммарное напряжение на обоих реактивных элементах будет равно нулю.

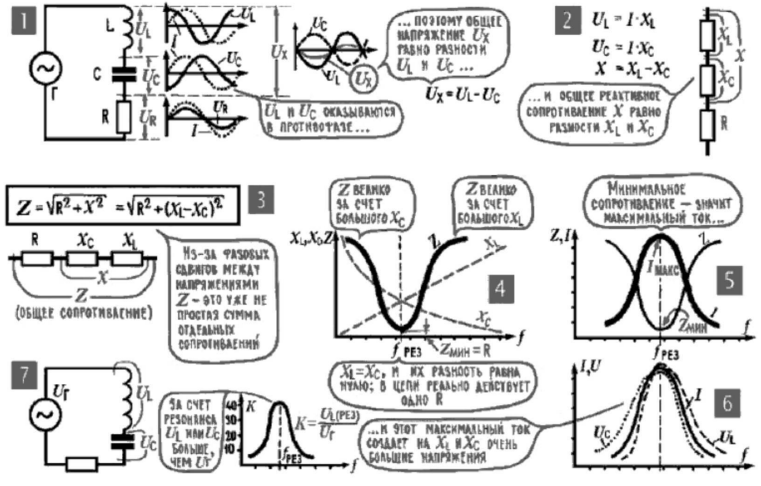


Рис. 2.34. Последовательный резонанс

Весь этот процесс называется последовательным резонансом, или резонансом напряжений. Если после резонанса продолжать увеличивать частоту, то X_L станет больше, чем

X_C, и в цепи в основном начнет действовать индуктивное сопротивление. Ток уменьшится, а вместе с ним уменьшатся и напряжения U_L и U_C.

2.7.2. Параллельный контур

Параллельный LC-контур можно рассматривать как цепь, состоящую из двух параллельно соединенных сопротивлений X_L и X_C. На низких частотах сопротивление X_L мало и катушка шунтирует конденсатор (т.е. пропускает часть тока через себя, причем значительную). На верхних частотах мало сопротивление X_C и конденсатор шунтирует катушку (значительная часть тока течет через него). И лишь на резонансной частоте никто никого не шунтирует, сопротивление параллельного контура оказывается весьма большим. При этом общий ток в цепи генератора уменьшается (работает закон Ома). Если включить такой параллельный контур в делитель напряжения (рис. 2.35, 4), то он за счет своего большого сопротивления на резонансной частоте будет выделять только напряжение этой частоты из всех напряжений, подведенных к контуру.

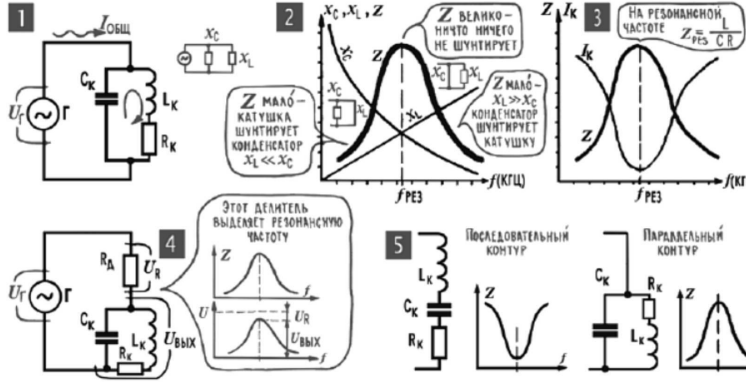


Рис. 2.35. Параллельный резонанс

И для последовательного, и для параллельного контуров резонансная частота рассчитывается по формуле

$f_0 = 1 / 2\pi\sqrt{(LC)}$.

Рассмотрим резонансный контур, настроенный на частоту 3 кГц, который возбуждается сигналом генератора с формой меандра частотой 1 кГц (рис. 2.36). В прямоугольном сигнале есть все нечетные гармоники, включая третью, поэтому в контуре возникают колебания всех частот с ее выделением. Контур практически подавляет составляющие всех частот, выделяя только частоту 3 кГц, на которую он настроен. По такому принципу работают входные высокочастотные узлы радиоприемников, выделяя нужную радиостанцию.

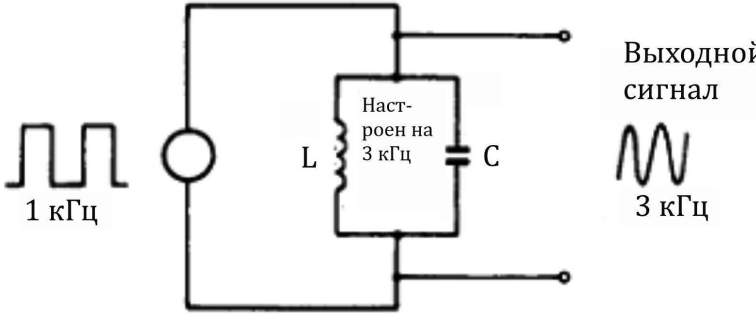


Рис. 2.36. Резонансный контур, выделяющий третью гармонику входного сигнала

2.8. Трансформатор

Электрический ток, протекающий по проводнику, создает вокруг этого проводника магнитное поле (рис. 2.37). Направление возникающего магнитного поля определяется направлением тока. Оно показано на рис. 2.38 и определяется правилом правого винта: если острие винта совместить с направлением тока, то при его завинчивании направление вращения рукоятки будет совпадать с направлением магнитного поля.

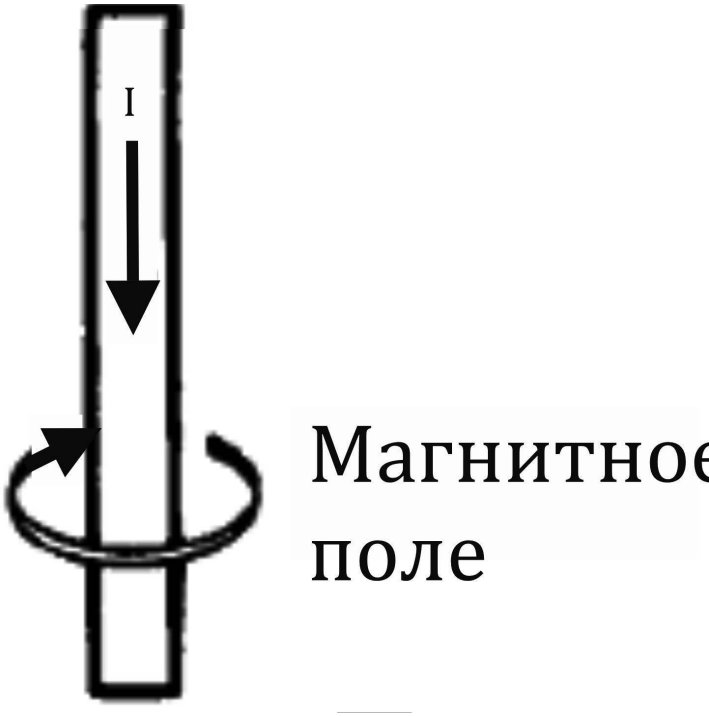


Рис. 2.37. Магнитное поле вокруг проводника с током

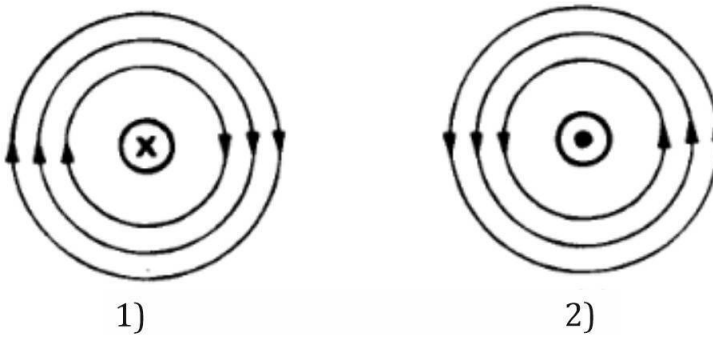


Рис. 2.38. Направление магнитного поля вокруг проводника с током: от наблюдателя (1) и к наблюдателю (2)

Если пропустить постоянный ток через катушку, состоящую из большого числа витков проволоки, то она становится магнитом. Создаваемое ей магнитное поле ничем не отличается от поля постоянного магнита. Если ее намотать на сердечник из стали, железа или другого магнитного материала, это поле будет еще сильнее. Также это поле зависит от силы тока. Электромагниты применяются в электрических звонках и реле.

Если через проводник пропустить не постоянный, а переменный ток, то создаваемое магнитное поле также будет переменным. Если рядом друг с другом разместить две катушки, то пропускание тока через одну из них будет вызывать переменное магнитное поле, которое в другой катушке вы-

зовет переменный ток. Это принцип работы трансформатора (рис. 2.39): приложенное к одной обмотке переменное напряжение U_1 вызывает появление переменного напряжения U_2 (индуцированной ЭДС) на второй обмотке.

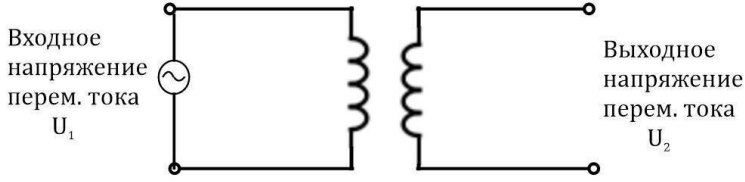


Рис. 2.39. Индуцированная ЭДС

Трансформатор состоит из двух отдельных обмоток, называемых первичной и вторичной обмотками. Входное напряжение переменного тока прикладывается к первичной обмотке и создает меняющееся магнитное поле. Это магнитное поле взаимодействует со вторичной обмоткой, индуцируя в ней напряжение переменного тока (точнее, ЭДС). Напряжение, индуцируемое во вторичной обмотке, имеет ту же частоту, что и входное напряжение, но его амплитуда определяется соотношением числа витков вторичной и первичной обмоток.

Если входное напряжение на выводах первичной обмотки = U_1, выходное напряжение на выводах вторичной обмотки = U_2, число витков первичной обмотки = N_1, число витков

вторичной обмотки = N_2, то справедливо следующее соотношение: $U_1 / U_2 = N_1 / N_2$.

КПД трансформатора близок к 100% (обычно это 96-99%). Мощность сигнала $P=U \cdot I$ трансформатор не увеличивает (во сколько раз напряжение на второй обмотке меньше, во столько же раз больше ток, и наоборот), токи имеют обратное количеству витков отношение друг к другу:

$I_2 / I_1 = N_1 / N_2$.

Если напряжение на вторичной обмотке трансформатора больше, чем на входе (на первичной обмотке), то его называют повышающим, и наоборот, если оно меньше, чем на первичной обмотке, то его называют понижающим. У повышающего трансформатора больше витков на вторичной обмотке, у понижающего - на первичной.

Трансформатор, изображенный на рис. 2.40, в цепи вторичной обмотки имеет нагрузочный резистор R_2. Сопротивление R_2 можно пересчитать или, как говорят, привести к первичной обмотке, т.е. к сопротивлению трансформатора R_1 со стороны первичной обмотки. Отношение R_1/R_2 называется коэффициентом приведения сопротивления. Его можно рассчитать следующим образом:

$R_1 / R_2 = (U_1 / I_1) / (U_2 / I_2) = (U_1 / U_2) * (I_2 / I_1) = (N_1 / N_2) * (N_1 / N_2) = (N_1 / N_2)^2$.

То есть если в первичной обмотке в два раза больше витков и нагрузка составляет 100 Ом, то сопротивление со сто-

роны первичной обмотки составит $100 * 2^2 = 400$ Ом.

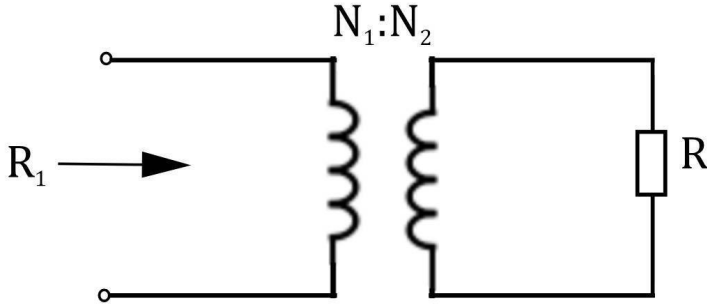


Рис. 2.40. Коэффициент приведения сопротивления $R_1/R_2 = (N_1/N_2)^2$

Трансформатор может иметь одну-единственную обмотку с отводом от части витков этой обмотки, как показано на рис. 2.41. Такой трансформатор называется автотрансформатором. Напряжение и ток на его выходе определяются теми же формулами, что приведены выше для обычного трансформатора.

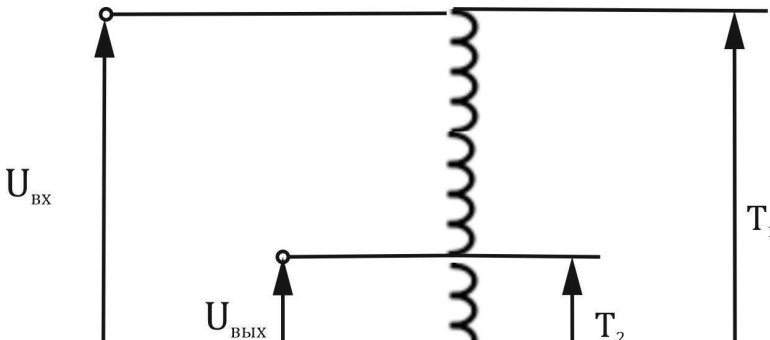


Рис. 2.41. Автотрансформатор

2.9. Метод Тевенина для вычисления выходного напряжения нагруженного делителя

Два элемента модели Тевенина вычисляются следующим образом (рис. 2.42). Заменяем исходную схему (без нагрузки) более простой схемой, называемой моделью Тевенина, которая представляет собой идеальный источник напряжения, включенный последовательно с резистором. Элементы схемы будут иметь следующие значения:

– $U_{ТЕВ}$ будет равно просто напряжению холостого хода U_{XX}, когда к делителю не подключено никакой нагрузки;

– сопротивление $R_{ТЕВ}$ представляется в виде дроби $U_{ТЕВ}$ / $I_{КЗ}$. Ток $I_{КЗ}$ - это ток, который протекает при соединении выхода схемы напрямую с "землей" (ток короткого замыка-

ния).

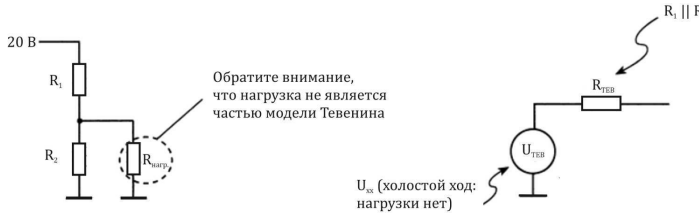


Рис. 2.42.

Конечно же, на практике такое делать крайне опасно. В подавляющем большинстве случаев закорачивание выхода на "землю" может повредить или полностью вывести из строя схему и иногда представляет опасность для экспериментатора. Представьте себе результат такого эксперимента с автомобильным аккумулятором! А если у нас есть принципиальная схема устройства, то можно применить намного менее трудоемкий способ.

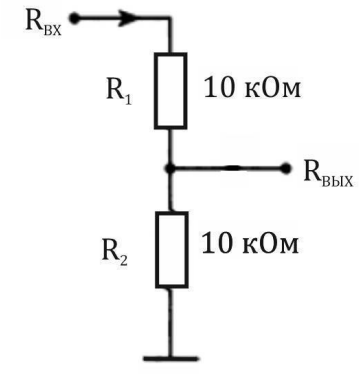


Рис. 2.43.

Пусть у нас имеется схема, изображенная на рис. 2.43. Необходимо найти ее входное и выходное сопротивления ($R_{вх}$ и $R_{вых}$).

1. Входное сопротивление $R_{вх}$.

Ясно, какое значение должен иметь делитель: просто $R_1 + R_2$. Но будет ли это правильным ответом на данный вопрос? Разве сигнал с выхода делителя не будет подаваться на что-то, подсоединенное к нему далее? Если нет, какой смысл в создании этого делителя?

Ответ, конечно же, "да", сигнал с выхода делителя будет подаваться на что-то - на нагрузку. Но это "что-то" должно представлять достаточно высокое входное сопротивление, чтобы оно не изменяло существенно результат, который мы

получили, когда не принимали нагрузку во внимание. Если нагрузка в 10 раз больше чем сопротивление одного плеча делителя (оно у нас равно 10 кОм), то наш результат будет вполне приемлемым. Вкратце можно сказать, что мы предполагаем достаточно большую нагрузку, чтобы наши результаты были похожи на правду. Идеалом является, конечно же, нагрузка с бесконечно большим входным сопротивлением (рис. 2.44).

Таким образом, ответом является $R_{вх} = R_1 + R_2 = 20$ кОм.

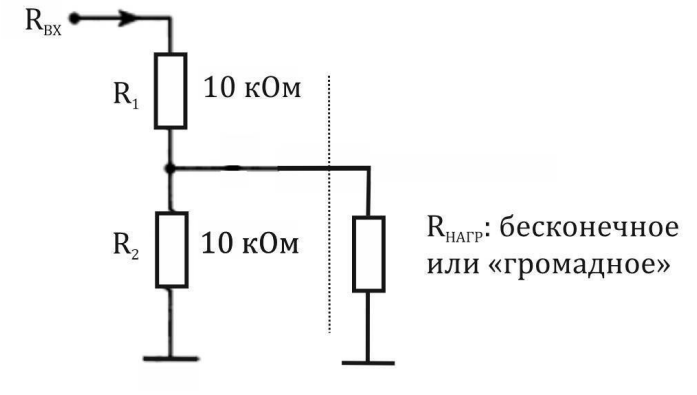


Рис. 2.44

2. Выходное сопротивление $R_{вых}$.

В соответствии с методом Тевенина $U_{тев} = U_{хх} = U_{вх} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$.

Эквивалентное сопротивление $R_{вых} = U_{тев} / I_{кз}$; $I_{кз} = U_{вх} / R1$, значит $R_{вых} = U_{вх} \cdot R_2 \cdot R_1 / (U_{вх} \cdot (R_1 + R_2)) = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$. Мы получили параллельное соединение резисторов делителя. Сначала этот результат кажется необычным. Казалось бы, почему сопротивление R_1, подключенное к положительному полюсу источника питания, должно считаться параллельным сопротивлению R_2? Причина в том, что сопротивление источника напряжения мы считаем предельно малым, а значит, если предположить, что напряжения нет, то мы получим верхний по схеме контакт R_1 подсоединенным к общему проводу. Значит со стороны выхода сопротивления R_1 и R_2 оказались включенными параллельно! Это подтверждает полученный по методу Тевенина результат, все вычислено верно. Нужно только помнить, что мы предположили, что сопротивление источника равно нулю (рис. 2.45), т.е. пренебрегли им. В действительности это, конечно же, не так, но недалеко от истины, потому что сопротивление источников напряжения достаточно мало (см. выше раздел 1.3.2 о внутреннем сопротивлении источника напряжения).

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.