

1. Пассивные компоненты электронных схем

1.1. Электрический ток

Электрическим током называют упорядоченное движение электрических зарядов. Электрический ток может проходить через различные вещества при определенных условиях. Одним из условий возникновения электрического тока является наличие свободных зарядов, способных двигаться под действием электрического поля.

Металлы состоят из положительно заряженных ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки и совокупности свободных электронов. При отсутствии электрического поля свободные электроны движутся хаотически, подобно молекулам идеального газа, а потому рассматриваются в классической электронной теории как **электронный газ**.

Под действием внешнего электрического поля меняется характер движения свободных электронов внутри металла. Электроны, продолжая хаотичные движения, вместе с тем смещаются в направлении действия сил электрического поля. Следовательно, **электрический ток в металлах** - это упорядоченное движение электронов.

Сила тока I в металлическом проводнике определяется по формуле:

$$I = e n_0 \bar{v} S$$

где e — модуль заряда электрона, n_0 - концентрация свободных электронов, \bar{v} - средняя скорость упорядоченного движения электронов, S - площадь поперечного сечения проводника.

Величина $j = I/S = en_0 v$ называется плотностью тока и измеряется в А/м². Обычно в медных проводах допустимая плотность тока составляет 6-10 А/мм².

На практике сила тока I определяется количеством электрического заряда q , проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = q/t.$$

Ток за бесконечно малый промежуток времени равен

$$i = dq/dt.$$

Сопротивление R электрическому току участка проводника зависит от удельного сопротивления проводника ρ_y , его длины l и площади поперечного сечения проводника S . Для однородного участка цепи:

$$R = \frac{\rho_y l}{S}.$$

Удельное сопротивление проводника зависит от температуры. Эта зависимость выражается соотношением:

$$\rho_y = \rho_{oy} (1 + \alpha \Delta T)$$

где ρ_{oy} — удельное сопротивление металлического проводника при температуре $T = 273K$, α — термический коэффициент сопротивления, $\Delta T = T - T_o$ —

изменение температуры. Удельное сопротивление металлов составляет примерно 10^{-7} Ом/м, а удельное сопротивление изоляторов находится в пределах $10^6 - 10^{16}$ Ом/м.

Различают постоянный и переменный ток. Постоянным называется ток, числовое значение и направление которого не меняется во времени. При переменном токе изменяется его величина и направление.

Сила тока I в проводниках по закону Ома прямо пропорциональна напряжению U на участке проводника и обратно пропорциональна сопротивлению участка проводника R :

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

Источники электрической энергии подразделяются на источники напряжения (электродвижущей силы - ЭДС) и источники тока. **Электродвижущая сила (ЭДС)** - в устройстве, осуществляющем принудительное разделение положительных и отрицательных зарядов (генераторе) – это величина, численно равная разности потенциалов между зажимами генератора при отсутствии тока в его цепи, измеряется в Вольтах. Источник ЭДС – идеальный источник энергии, напряжение на выводах которого при любом токе I через источник остается неизменным и равным его ЭДС E . Источник тока – это идеальный источник энергии, ток которого при любом напряжении на его выводах остается неизменным $I = J = \text{const.}$.

На рис.1.1 изображены схемы идеальных источника ЭДС (а) и его вольт-амперная характеристика (б) и источника тока (в и г), а также схема источника тока (в) и его вольт-амперная характеристика (г). Предполагается, что ток I замыкается через приемники, которые подключены к соответствующим источникам.

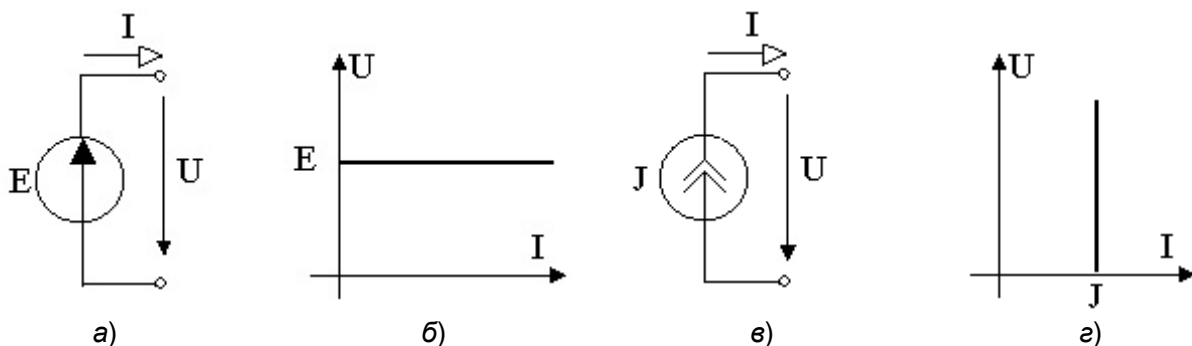


Рисунок 1.1 – Идеальные источники напряжения и тока и их характеристики

В идеальном источнике ЭДС внутреннее сопротивление равно нулю. А в источнике тока – бесконечности. В реальном источнике ЭДС внутреннее сопротивление отлично от нуля и обычно имеет доли Ома. В реальном источнике тока внутреннее сопротивление высокое, но имеет конечную величину. По этой причине в реальном источнике напряжение на его клеммах изменяется незначительно при изменении тока нагрузки от нуля до некоторого максимального

значения. В реальном источнике тока выходной ток изменяется незначительно при изменении напряжения на нагрузке от нуля до некоторого максимального значения.

При разомкнутых клеммах источника напряжения, т.е. при отсутствии тока в цепи (режим холостого хода) напряжение холостого хода U_{xx} равно ЭДС источника E . При замыкании выводов источника выходное напряжение на клеммах $U=0$, а ток I достигает максимального значения $I_{кз}$, который называют током короткого замыкания. Напряжение U_{xx} , ток $I_{кз}$ и сопротивление $r_{вн}$ являются параметрами линейного источника энергии, полностью определяющие его свойства. На рис. 1.2 изображены эквивалентные схемы реальных источников напряжения (а) и тока (б).



Рисунок 1.2 – Схемы реальных источников напряжения и тока

1.2. Электрические сигналы

Под **сигналом** в общем случае понимают любую физическую величину (например, температуру, давление воздуха, интенсивность света, силу тока и т.д.), однозначно отображающую информационное сообщение. В информационных и вычислительных системах для отображения информационных сообщений применяются электрические сигналы (электрический ток или напряжение), а также оптические сигналы, представляющие собой изменяющуюся во времени интенсивность света.

Сигналы подразделяются на непрерывные (аналоговые) и дискретные (цифровые).

Аналоговый сигнал — это сигнал, который может принимать любые значения в определенных пределах (например, напряжение может плавно изменяться в пределах от нуля до десяти вольт). Устройства, работающие только с аналоговыми сигналами, называются аналоговыми устройствами. Название "аналоговый" подразумевает, что сигнал изменяется аналогично физической величине, то есть непрерывно.

Цифровой сигнал — это сигнал, который может принимать только дискретные значения: чаще два (иногда - три). Причем разрешены некоторые отклонения от этих значений (рис. 1.3). Например, напряжение может принимать два значения: от 0 до 0,4 В (уровень логического нуля) или от 2,4 до 5 В (уровень логической единицы). Устройства, работающие исключительно с цифровыми сигналами, называются цифровыми устройствами.

В отличие от аналоговых, цифровые сигналы, имеющие всего два разрешенных значения, более устойчивы по отношению к воздействию шумов, наводок и помех. Небольшие отклонения от разрешенных значений никак не искажают *цифровой сигнал*, так как всегда существуют зоны допустимых отклонений. Именно поэтому цифровые сигналы являются более помехоустойчивые и допускают гораздо более сложную и многоступенчатую обработку, гораздо более длительное хранение без потерь и гораздо более качественную передачу по каналам связи, чем аналоговые.

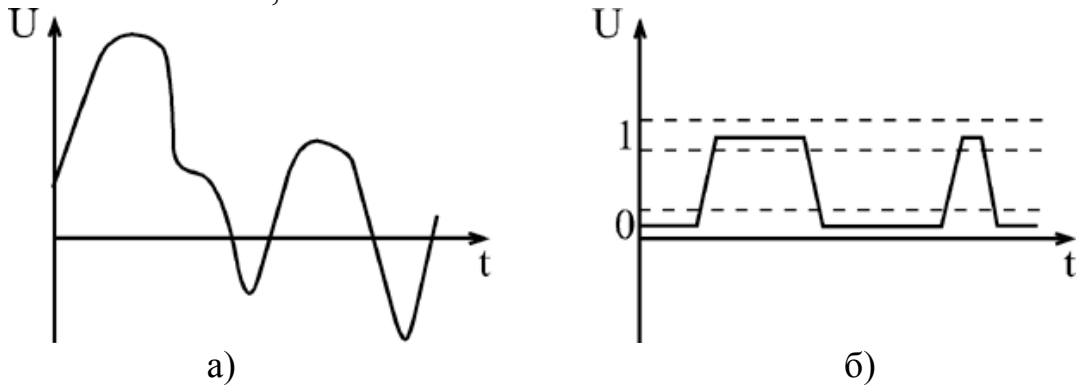


Рисунок 1.3 – Форма аналогового (а) и цифрового (б) сигналов

Цифровой сигнал представляет собой электрический импульс, под которым понимается кратковременное отклонение амплитуды напряжения или тока от его установившегося значения. Основной способ получения электрического импульса — это коммутация (переключение) цепей постоянного тока. В цифровых и аналого-цифровых устройствах наибольшее распространение получили импульсные сигналы постоянного тока следующей формы (рис.1.4):

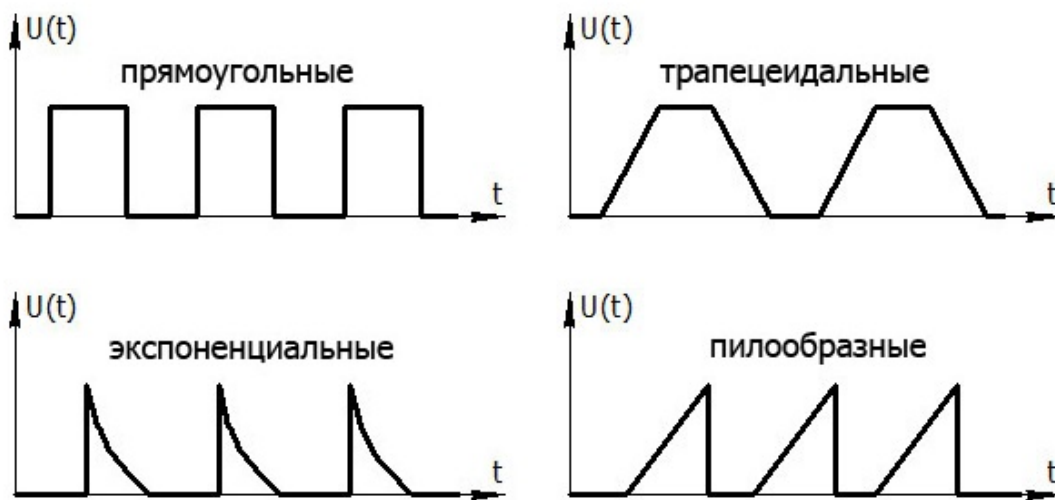


Рисунок 1.4 – Формы электрических импульсов постоянного тока

На практике форма импульсов отличается от представленных на рисунке 1.4. Это связано с тем, что в реальной электрической цепи на форму импульсов оказывают влияние паразитные емкости, индуктивности и т.д. На рисунке 1.5

изображена форма реального прямоугольного импульса с его основными параметрами:

U_m — **амплитуда импульса** — максимальное значение напряжения импульса данной формы;

t_{ua} — **активная длительность импульса** — временной интервал, измеренный на уровне половины от амплитуды импульса U_m , для трапецеидальных и экспоненциальных также t_{ua} берется на уровне $0,5 U_m$. Иногда длительность импульса t_u определяют по уровню $0,1 U_m$;

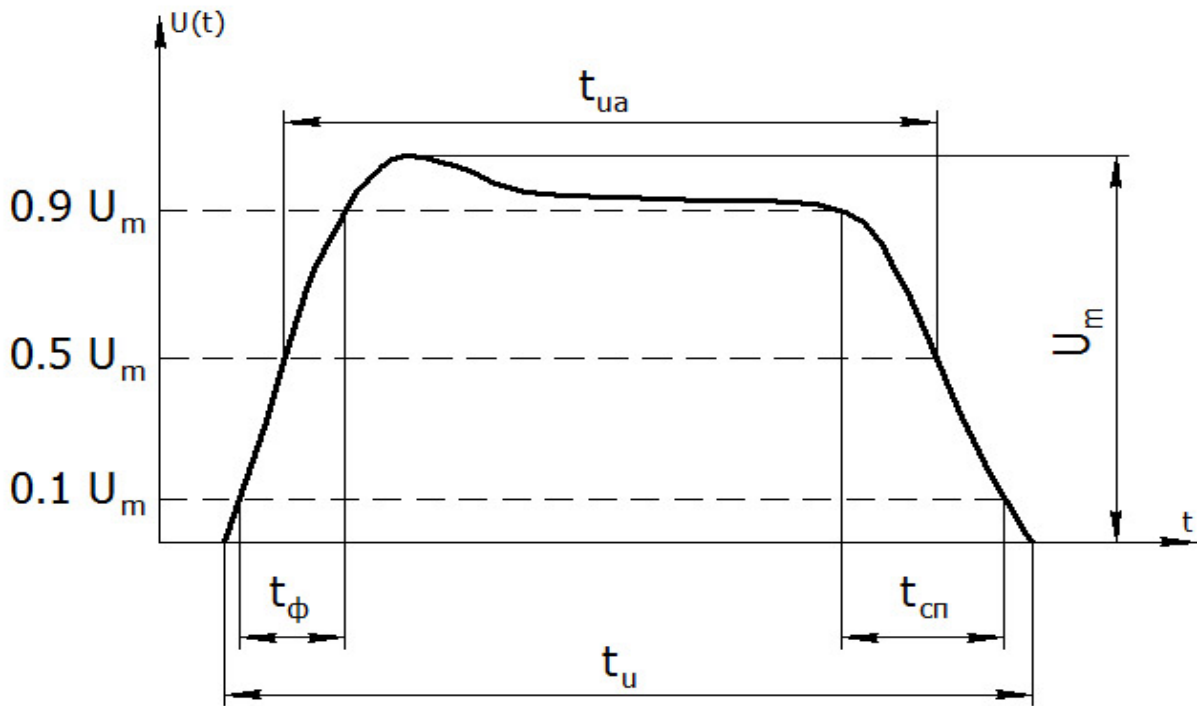


Рисунок 1.5 — Форма реального прямоугольного импульса

t_ϕ , $t_{сн}$ — **передний и задний фронт** — время нарастания и спада импульса;

t_ϕ — **время нарастания переднего фронта** — временной интервал, в течение которого амплитуда импульса U_m увеличивается от $0,1 U_m$ до $0,9 U_m$;

$t_{сн}$ — **время спада заднего фронта** — временной интервал, в течение которого амплитуда импульса уменьшается от $0,9 U_m$ до $0,1 U_m$.

Обычно информационная последовательность символов отображается импульсной последовательностью, вид которой показан на рис. 1.6. Прямоугольные импульсы, длительность которых равна длительности паузы нулевой амплитуды (половине периода) называют **меандром**.

Периодическая последовательность импульсов характеризуется следующими параметрами:

T — **период импульса**, представляет собой интервал времени между началами или окончаниями 2-х соседних импульсов;

$\alpha = T / t_u$ — **скважность**, измеряется в относительных единицах, показывает во сколько раз период импульса больше его длительности;

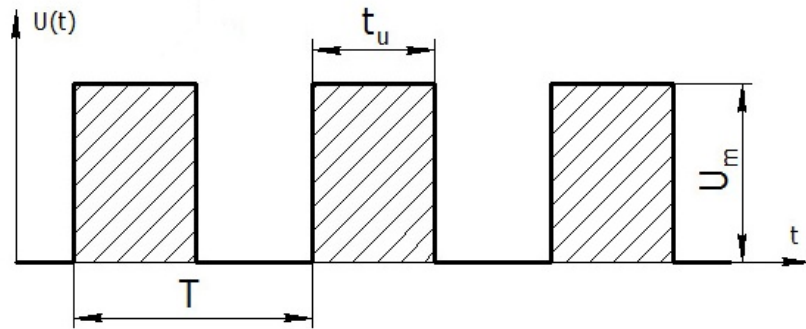


Рисунок 1.6 – Импульсная последовательность

$\gamma = t_u / T$ — коэффициент заполнения импульсной последовательности (величина, обратная скважности), она всегда меньше единицы.

Не смотря на то, что скважность и коэффициент заполнения могут использоваться в одинаковом контексте, физический смысл их отличается. Эти величины безразмерны. Коэффициент заполнения обычно выражают в процентах (%).

Важной характеристикой импульсной последовательности является понятие **среднего напряжения** (или тока) — U_{cp} . Это понятие характеризует постоянную составляющую (эквивалентное значение постоянного напряжения), имеющуюся в той или иной последовательности импульсов, поэтому накладывает важные ограничения на выбор и проектирование аппаратуры.

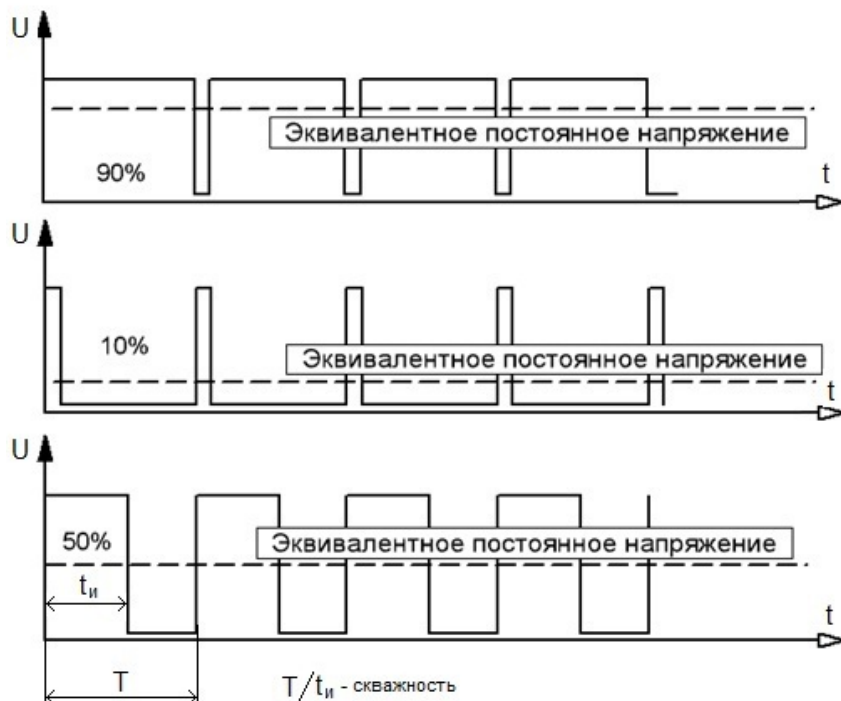


Рисунок 1.7 –Изменение величины постоянной составляющей сигнала при различных значениях коэффициента заполнения

Для разнополярных импульсов U_{cp} вычисляется по формуле:

$$U_{cp} = [U_m t_{и} - U_m (T - t_{и})] / T = 2\gamma U_m - U_m ,$$

а для однополярной последовательности среднее напряжение принимает значение:

$$U_{cp} = U_0 / \alpha = \gamma U_0 .$$

На рисунке 1.7 пунктирной линией показано изменение постоянной составляющей напряжения в периодической импульсной последовательности при различных значениях коэффициента заполнения.

1.3. Параметры переменного тока и напряжения

Переменным током (напряжением) называется ток, который постоянно меняет во времени свое значение и направление (+ на – и наоборот). Наиболее широко в электрических цепях применяется переменное напряжение синусоидальной формы (рис.1.8 а). Для оценки количественных показателей и для измерений и расчётов применяются их следующие параметры:

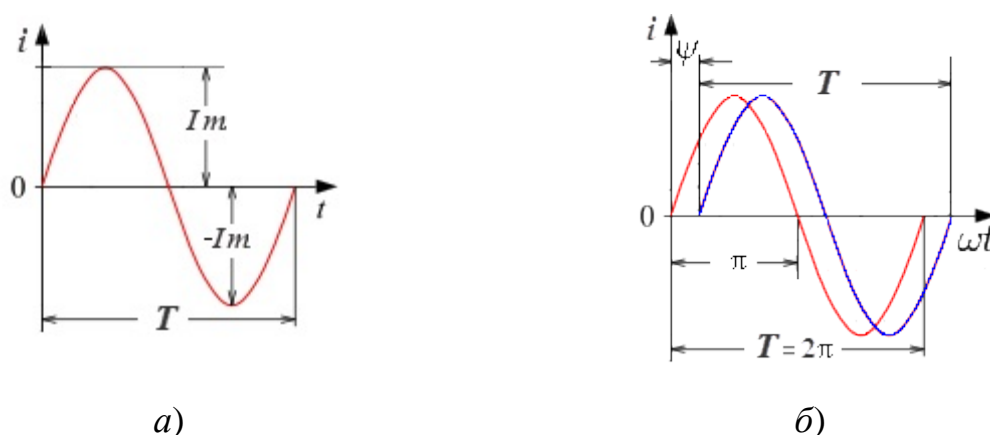


Рисунок 1.8 – Параметры сигналов переменного тока

Период T - время, в течение которого происходит один полный цикл изменения тока в обоих направлениях относительно нуля или среднего значения.

Частота f - величина, обратная периоду T , численно равная количеству периодов колебаний за одну секунду. Один период в секунду это 1 Гц.

$$f = 1/T.$$

Круговая (циклическая) частота ω – угловая частота, равная количеству периодов за 2π секунд.

$$\Omega = 2\pi f = 2\pi/T.$$

Обычно Ω используется при расчётах тока и напряжения синусоидальной формы. Тогда в пределах периода можно не рассматривать частоту и время, а исчисления производить в радианах или градусах. $T = 2\pi = 360^\circ$.

Начальная фаза ψ — величина угла от нуля ($\omega t = 0$) до начала периода. Измеряется в радианах или градусах, показана на рисунке 1.6,б для синего графика синусоидального тока.

Начальная фаза может быть положительной или отрицательной величиной, соответственно справа или слева от нуля на графике.

Мгновенное значение — величина напряжения или тока измеренная относительно нуля в любой выбранный момент времени t .

$$I = i(t); \quad u = u(t).$$

Последовательность всех мгновенных значений в любом интервале времени можно рассмотреть как функцию изменения тока или напряжения во времени. Например, синусоидальный ток или напряжение можно выразить функцией:

$$i = I_m \sin(\omega t); \quad u = U_m \sin(\omega t).$$

С учётом начальной фазы:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi); \quad u = U_m \sin(\omega t + \psi).$$

Здесь I_m и U_m — амплитудные значения тока и напряжения.

Амплитудное значение — максимальное по модулю мгновенное значение за период.

$$I_m = \max|i(t)|; \quad U_m = \max|u(t)|.$$

Может быть положительным и отрицательным в зависимости от положения относительно нуля.

Часто вместо амплитудного значения применяется термин **амплитуда** тока (напряжения) — максимальное отклонение от нулевого значения.

Среднее значение — определяется как среднеарифметическое всех мгновенных значений за период T .

$$I_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad U_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

Среднее значение является постоянной составляющей **ДС** напряжения и тока. Для синусоидального тока (напряжения) среднее значение равно нулю.

Эффективное (среднеквадратичное) значение переменного тока — это значение постоянного тока, который, проходя через активную линейную нагрузку (например, резистор), выделяет за тот же промежуток времени такое же количество тепла, какое выделит в этой нагрузке переменный ток. Именно эффективное значение тока важно применительно к нагревательным приборам.

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

Для синусоидального тока и напряжения амплитудой I_{amp} (U_{amp}) среднеквадратичное значение определится по формулам:

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{\text{amp}} \sin^2(2\pi ft) dt} = \frac{I_{\text{amp}}}{\sqrt{2}}$$

$$U_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{\text{amp}} \sin^2(2\pi ft) dt} = \frac{U_{\text{amp}}}{\sqrt{2}}.$$

1.4. Резисторы, конденсаторы, индуктивности

К наиболее массовым пассивным элементам электронных схем относятся резисторы и конденсаторы. Несколько реже в устройствах информационной техники применяются катушки индуктивности.

Резисторы — пассивные элементы электрических цепей, обладающие фиксированным или переменным значением электрического сопротивления. Они служат для задания в определенных точках схемы требуемых напряжений, ограничения тока, поглощения электрической энергии и др.

К основным параметрам резисторов относятся:

- номинальное сопротивление, Ом;
- предельная рассеиваемая мощность, Вт;
- температурный коэффициент сопротивления Ом/град;
- допустимое отклонение сопротивления от номинального значения, %;
- предельное рабочее напряжение, В.

Величина $G=1/R$ (обратная сопротивлению цепи) называется проводимостью. Проводимость измеряется в **Сименсах**. 1сим=1/1 Ом.

При последовательном соединении резисторов их сопротивления складываются:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$

Если все сопротивления резисторов одинаковы, то общее сопротивление равно: $R_{\text{общ}} = nR$.

При параллельном соединении резисторов складываются их проводимости. Для двух параллельно соединенных резисторов их общее сопротивление равно:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Для создания в некоторой точке схемы **a** напряжения U_2 определенного уровня применяется делитель напряжения (рис.1.9).

Требуемое напряжение U_2 рассчитывается на основании закона Ома.

$$U_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} R_2.$$

Следует обратить внимание, что сопротивление нагрузки делителя напряжения должно быть много больше собственного сопротивления делителя, так, чтобы в расчетах этим сопротивлением, включенным параллельно, можно было бы пренебречь.

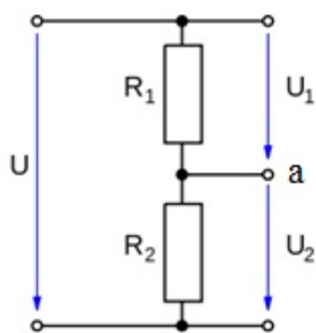


Рисунок 1.9 – Схема делителя напряжения

Конденсаторы – одни из самых распространённых радиоэлементов. Функция конденсаторов в электронной схеме заключается в накоплении электрического заряда, разделении постоянной и переменной составляющей тока, сглаживания выбросов напряжений и токов, формирование импульсов и др.

Конструктивно конденсатор состоит из двух проводящих обкладок, изолированных диэлектриком. В зависимости от конструкции и назначения конденсатора диэлектриком может служить воздух, бумага, керамика, слюда.

Основными параметрами конденсаторов являются:

- **Номинальная ёмкость.** Ёмкость измеряют в **Фарадах (Ф)**. Ёмкость в 1 Фараду очень велика. На практике в электронике и радиотехнике используются конденсаторы с ёмкостью равной миллионной доле фарады – микрофарада ($1\text{мкФ} = 0,000001\text{Ф} = 10^{-6}\text{Ф}$). Также находят применение конденсаторы с ёмкостями исчисляемыми десятками – сотнями нанофарад ($1\text{нФ} = 10^{-9}\text{Ф}$) и пикофарад ($1\text{пФ} = 10^{-12}\text{Ф}$). Номинальную ёмкость указывают на корпусе конденсатора.

- **Номинальное напряжение.** Это напряжение, при котором конденсатор выполняет свои функции. При превышении допустимого значения конденсатор может быть пробит, то есть, превратится в обычный проводник. Диапазон допустимых значений рабочих напряжений конденсаторов лежит в пределах от нескольких вольт до единиц киловольт. Номинальное напряжение маркируют на корпусе конденсатора.

- **Допуск.** Также как у резисторов и у конденсаторов есть допустимое отклонение величины его реальной ёмкости от той, что указана на его корпусе. Допуск обозначается в процентах. Допуск у конденсаторов может достигать **20 – 30%**. В технике, где требуется особая точность номинальных значений ёмкости, например, в фильтрах с заданной характеристикой, применяются конденсаторы с малым допуском (**1% и менее**).

Кроме обычных существуют ещё и электролитические конденсаторы. Их название обусловлено электролитом, которым пропитывает изоляционный материал между обкладками конденсатора. Ёмкость их намного больше, чем у

обычных, габариты также существенно больше. *Отличительная особенность электролитических конденсаторов – полярность.* Если обычные конденсаторы можно впаивать в схему не беспокоясь о полярности прикладываемого к конденсатору напряжения, то электролитический конденсатор необходимо включать в схему строго в соответствии с полярностью напряжения. У электролитических конденсаторов один вывод плюсовой, другой минусовой. Обозначение электролитического конденсатора на схемах показано на рисунке 1.9,б.



Рисунок 1.9 – Обозначение обычного конденсатора (а) и электролитического (б)

При параллельном соединении конденсаторов общая эквивалентная емкость такой цепи равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n .$$

При последовательном включении конденсаторов обратная величина общей емкости равна сумме обратных величин их емкостей:

$$1/C_{\text{общ}} = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots + 1/C_n .$$

Последовательное соединение конденсаторов применяется, когда рабочее напряжение цепи выше допустимого напряжения конденсатора.

Конденсатор в цепи переменного тока обладает реактивным емкостным сопротивлением, величина которого обратно пропорциональна емкости конденсатора C и круговой частоте переменного тока ω :

$$X_c = 1/\omega C \text{ [Ом]}.$$

Ток конденсатора определяется по формуле:

$$I = C \frac{dU_c}{dt}.$$

В цифровой и импульсной схемотехнике широко используются RC-цепочки в качестве дифференцирующего (рис.1.10,а) или интегрирующего (рис.1.10,б) звена.



Рисунок 1.10 – Дифференцирующая (а) и интегрирующая (б) цепочки

Запишем для RC-цепочки (рис.1.10,а) дифференциальное уравнение, связывающее входное и выходное напряжение. Так как ток через емкость равен

$$i_c = C \frac{du_c}{dt},$$

и в соответствии с законами Кирхгофа и Ома

$$u_c = u_{ex} - u_{вых},$$

$$u_{вых} = iR = CR \frac{du_c}{dt},$$

то

$$u_{вых} = CR \left(\frac{du_{ex}}{dt} - \frac{du_{вых}}{dt} \right),$$

откуда получаем

$$\frac{du_{вых}}{dt} + \frac{1}{CR} u_{вых} = \frac{du_{ex}}{dt}.$$

При условии

$$\frac{du_{вых}}{dt} \ll \frac{1}{CR} u_{вых}, \quad (1)$$

имеем приближенное равенство

$$u_{вых} \approx CR \frac{du_{ex}}{dt},$$

т.е. схема в этом случае приближенно выполняет операцию дифференцирования.

Если же имеет место противоположное неравенство, т.е.

$$\frac{du_{вых}}{dt} \gg \frac{1}{CR} u_{вых}, \quad (2)$$

то получаем приближенное равенство вида

$$u_{вых} \approx u_{ex},$$

т.е. цепочка в этом случае приближенно повторяет сигнал.

Если теперь выходное напряжение снимать с емкости (рис.1.10,б), то дифференциальное уравнение будет иметь вид:

$$RC \frac{du_{вых}}{dt} + u_{вых} = u_{ex}.$$

При выполнении условия (1) получаем

$$u_{вых}(t) \approx u_{ex}(t),$$

а при выполнении условия (2), получим

$$RC \frac{du_{вых}}{dt} \approx u_{ex},$$

откуда имеем

$$u_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{RC} \int u_{\text{вх}}(t) dt, \quad (3)$$

т.е. в этом случае получаем на выходе сигнал, пропорциональный интегралу от входного, следовательно, цепочка (рис.10) является интегрирующей.

На рисунке 1.11,а показана временная диаграмма сигналов на выходе дифференцирующей цепочки, а на рис. 1.11,б – интегрирующей при подачи на вход цепочек последовательности прямоугольных импульсов.

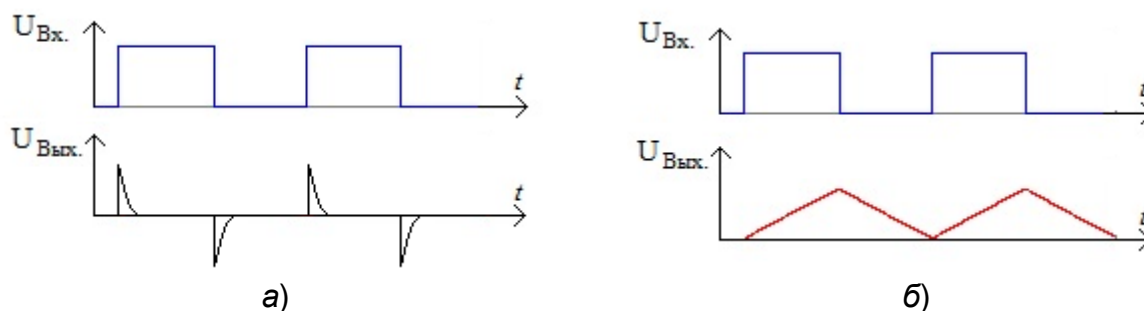


Рисунок 1.11 – Временные диаграммы дифференцирующей (а) и интегрирующей (б) RC-цепочек

Катушкой индуктивности называется пассивный элемент, представляющий собой деталь, имеющую многовитковую обмотку выполненную на каркасе из изоляционного материала. *Катушки индуктивности*, в отличие от унифицированных резисторов и конденсаторов, являются нестандартными изделиями, а их конфигурация определяется из расчёта на определённое устройство.

Основным параметром катушки индуктивности является индуктивность L , измеряемая в Генри (Гн). Величина индуктивности пропорциональна количеству квадрата витков катушки w и обратно пропорциональна магнитному сопротивлению сердечника катушки R_M : $L = w^2/R_M$.

Поэтому, вводя в катушку индуктивности стержень с малым магнитным сопротивлением, который может быть изготовлен из феррита, магнетита, железа и т.д., ее индуктивность заметно увеличивается. Подобное свойство позволяет уменьшить общее количество витков катушки и получить требуемую индуктивность. Индуктивность катушки можно регулировать поворотом резьбового сердечника, ввинчивая или вывинчивая его в катушку.

На рис.1.12 показаны условные обозначения катушек индуктивности различного типа в электрических схемах: $L1$ - одиночная катушка; $L2$ -катушка индуктивности с отводами; $L3$ -катушка с магнитодиэлектрическим сердечником; $L4$ - катушка с регулируемой индуктивностью и ферритовым сердечником. Иногда на обозначении катушки у одного из выводов ставится точка, которая обозначает начало катушки.

Дроссель, это та же катушка индуктивности, которая обладает большим сопротивлением переменному и малым сопротивлением постоянному току. Дроссели используются в качестве компонентов в различных электротехнических и радиотехнических приборах и устройствах. Большое количество их установлено на системной плате и в блоке питания компьютера.

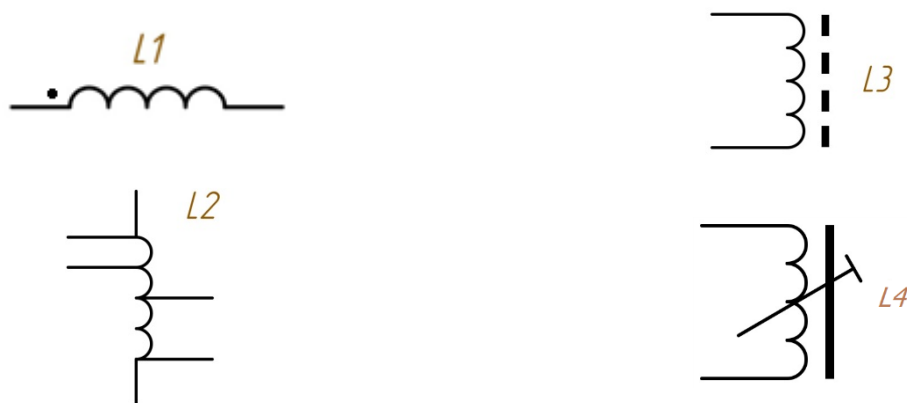


Рисунок 1.12 – Условные графические обозначения катушек индуктивности различных типов

По закону электромагнитной индукции при протекании по катушке тока, изменяющегося во времени со скоростью di/dt , в ней индуцируется ЭДС самоиндукции e_L :

$$e_L = -L \frac{di}{dt}.$$

Знак минус означает, что при увеличении тока в катушке, наводимая в ней ЭДС самоиндукции будет препятствовать возрастанию этого тока, а при убывании тока, ЭДС самоиндукции будет поддерживать ток в катушке, препятствуя его убыванию.

Катушка индуктивности обладает реактивным сопротивлением x_L , которое пропорционально индуктивности катушки L и круговой частоте ω . Обычно активное сопротивление катушки (сопротивление медного провода) очень мало. Поэтому можно записать:

$$x_L = \omega L.$$

При последовательном включении катушек индуктивности общая индуктивность равна сумме индуктивностей отдельных катушек.

При расчете электрических цепей постоянного и переменного тока, наряду с законом Ома широко используются первый и второй закон Кирхгофа:

1-й закон Кирхгофа гласит, что алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю, т.е.:

$$\sum_i I = 0.$$

2-й закон Кирхгофа: алгебраическая сумма ЭДС E_i равна алгебраической сумме напряжений U_k :

$$\sum_i E_i = \sum_k U_k.$$