

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ  
Физико-технический факультет  
Кафедра Электроники и астрофизики

Алимгазинова Н.Ш.

**Теоретические основы электротехники**

для студентов, обучающихся по специальности  
«Промышленная электроника и системы управления»

Алматы, 2025

# 1 лекция. Линейные электрические цепи постоянного тока

**Цель лекции.** Изучить основные понятия электрических цепей, законы их функционирования и математические методы описания; овладеть знаниями о структуре, элементах и моделях электрических цепей, а также о применении топологических методов при анализе сложных электрических схем.

## План

1. Электрический ток, потенциал, напряжение, ЭДС
2. Классификация электрических цепей.
3. Основные элементы электрических цепей: источники тока и напряжения, резистор, конденсатор, катушка индуктивности.
4. Электрические схемы. Основные определения.
5. Понятие о компонентных и топологических уравнениях. Граф. Виды. Изоморфные и гомеоморфные графы. Подграфы. Топологические матрицы.

### 1. Электрический ток, потенциал, напряжение, ЭДС

*Электрическим током называется упорядоченное движение заряженных частиц в проводящей среде под действием электрического поля.* В металлах и вакууме это перемещение электронов, а в электролитах и газах – положительных (+) катионов и отрицательных (-) ионов.

Численно электрический ток определяется как предел отношения количества электричества, перенесенного заряженными частицами сквозь поперечное сечение проводника за промежуток времени, стремящийся к нулю:

$$i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}, \quad (1)$$

где  $q$  - суммарное количество электричества положительных и отрицательных зарядов, которые переместились в противоположные стороны за время  $\Delta t$ .

В международной системе единиц (СИ) ток измеряют в амперах (А); заряд в кулонах (Кл) или ампер-секундах (А·с); время секундах (с).

*Ампер – величина неизменного тока, который проходя по двум параллельным прямоугольным проводникам бесконечной длины и пренебрежимо малого сечения, расположенным на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины.*

Различают *постоянный* и *переменный* ток. Если скорость движения заряженных частиц во времени неизменна, то ток – *постоянный*, если значения тока изменяются во времени, то его называют *переменным*.

Электрическому току приписывают *направление*, которое совпадает с направлением перемещения положительных зарядов и противоположно движению отрицательных зарядов. Направление тока характеризуется знаком.

*Положительное направление тока выбирается произвольно и обозначается стрелкой.*

**Напряжение** это работа по перемещению единичного заряда между определенными точками 1 и 2 пространства, которое определяется выражением:

$$u_{12} = \int_1^2 Edl, \quad (2)$$

или

$$u_{12}(t) = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta q} = \frac{dW}{dq}, \quad (3)$$

где  $E$  - напряженность поля, определяемая зарядами в рассматриваемой области  $l$ ,  $W$  - энергия, затрачиваемая на перемещение единичного заряда  $q$ .

Наряду с вышесказанными определениями электрическим напряжением называют *разность потенциалов*.

**Разность электрических потенциалов** – это электрическое напряжение в безвихревом электрическом поле, которое характеризуются независимостью выбора пути интегрирования:

$$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (4)$$

причем под **потенциалом** точки понимают количество энергии, затрачиваемое на перемещение единицы заряда из рассматриваемой точки в бесконечно удаленную точку пространства  $\infty$ , потенциал которой считается равным нулю  $\varphi_\infty = 0$ .

В международной системе единиц (СИ) напряжение измеряют в вольтах (В), энергию в джоулях (Дж).

**Вольт** – величина электрического напряжения, вызывающего в электрической цепи постоянный ток силой 1 А при мощности 1 Вт.

Различают *постоянное и переменное напряжение*.

**Положительное направление** отсчета напряжения соответствует направлению перемещения положительно заряженных частиц от более высокого потенциала точки 1 к более низкому потенциалу точки 2.

**Электродвижущая сила (ЭДС)** создается сторонними силами, под которыми понимают не электростатические силы, действие которых на электроны проводимости в проводнике вызывает их упорядоченное движение и поддерживает ток в цепи. Сторонние силы, в отличие от кулоновских, не соединяют разноименные заряды, а вызывают их разъединение и поддерживают разность потенциалов на концах проводника. Сторонние силы вызывают не электростатическое электрическое поле  $E_{стор}$ , обеспечивающее упорядоченное движение электрических зарядов. Суммарное действие электрического поля сторонних сил вдоль части контура  $L$  характеризуется ЭДС

$$e = \int_L E_{cstop} dl, \quad (5)$$

которая создается источниками электрической энергии (гальваническими элементами, электрическими генераторами и т.п.).

В международной системе единиц (СИ) ЭДС измеряют в вольтах (В).

Различают *постоянное* и *переменное* ЭДС.

## 2. Классификация электрических цепей

Электрическая энергия является самым распространенным видом энергии, используемым человечеством в наше время. Электричество стало основой развития всех отраслей техники, транспорта, электросвязи, сельского хозяйства, оно является неотъемлемой частью нашего быта.

Электрическая энергия, являясь частью электромагнитной энергии, получила широкое распространение благодаря тому, что возможна передача на расстояния и её преобразование в другие формы энергии: тепловую, механическую, химическую и другие.

Практически все существующие электротехнические, радиотехнические и электронные устройства относятся к электромагнитным системам, в которых основные процессы подчиняются основным законам электричества и магнетизма. Точный анализ происходящих процессов, описываемых системой уравнений Максвелла в частных производных, даже в простейшем случае является сложной задачей. Поэтому для инженерных расчетов и проектирования различных устройств необходима количественная оценка. В связи с этим возникла потребность в приближенных методах анализа, позволяющие с определенной степенью точности решать широкий спектр задач. Именно такие методы дают теоретические основы электротехники.

**Электрической цепью (ЭЦ) называется совокупность устройств, предназначенных для передачи, распределения и взаимного преобразования электрической энергии и информации, если процессы, протекающие в устройствах, могут быть описаны при помощи понятий об ЭДС, токе и напряжении.**

При построении электрических цепей оперируют понятиями: узел, ветвь и контур.

**Ветвью** называют часть электрической схемы, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных источников и приемников электрической энергии, ток в которых один и тот же. Ветви, содержащие источники энергии называются **активными**. Ветви, содержащие приемники энергии называются **пассивными**. Количество ветвей в схемах обозначают - *n*.

.

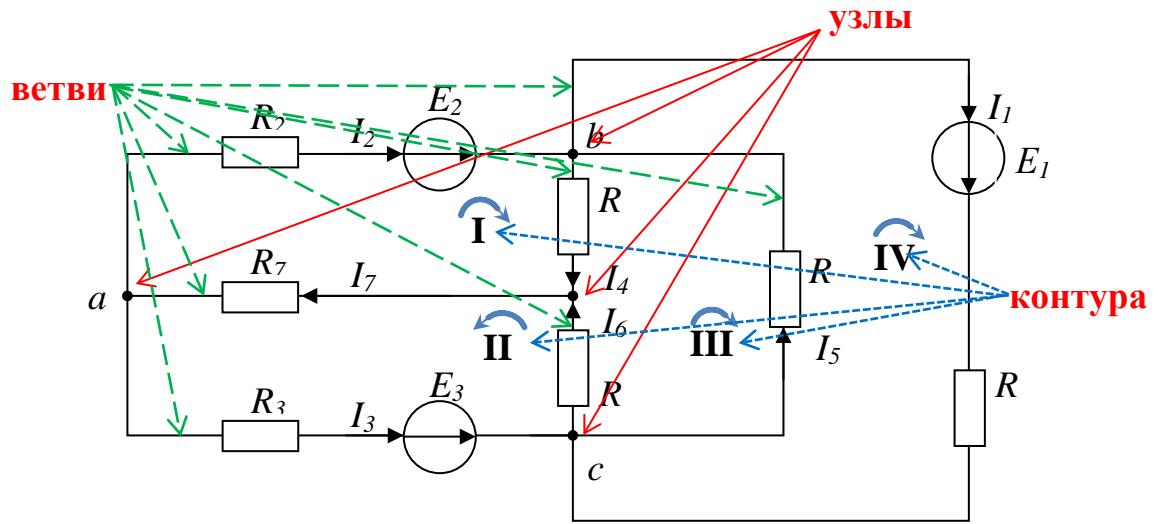


Рисунок 1 – Пример электрической цепи

**Узел** – место соединения трех и более ветвей. Следовательно, **ветвь** это участок схемы между двумя узлами, через который протекает только один ток. Количество узлов в схемах обозначают -  $m$ .

**Контур** – любой замкнутый путь, образованный ветвями схемы. Схема может содержать как один контур, так множество контуров. Выделяют на схемах **главные и независимые контура**. Главным принято называть контур, в котором не содержатся другие контуры. Контур может быть *независимым от источника тока*, при этом количество таких контуров можно определить следующим образом:  $k = n - m - n_{\text{HT}} + 1$ , где  $n_{\text{HT}}$  – количество ветвей, содержащих источники тока.

ЭЦ состоит из отдельных частей, выполняющих определенные функции, которые называются **элементами**. В общем случае, элементы ЭЦ подразделяются на *источники электрической энергии (ИЭ)*, *приемники (нагрузки) (ПЭ)* и *промежуточные звенья (ПЗ)* (проводы, аппараты, измерительные приборы, выключатели), которые соединяют источники с приемниками.

**Источниками электрической энергии** называются электротехнические устройства, производящие электрическую энергию путем преобразования химической, молекулярно-кинетической, тепловой, механической и других видов энергии. Ими являются химические источники тока, термоэлементы, аккумуляторы, генераторы и другие устройства.

**Приемниками электрической энергии** называются электротехнические устройства, потребляющие электрическую энергию путем превращения её в световую, тепловую, механическую или другие виды. Ими являются электрические лампы, электронагревательные приборы, электродвигатели и другие устройства.

Под **элементами** в ТЭЦ понимают не составные части электротехнических устройств, которые физически существуют, а их

*идеализированные модели, которые приближенно воспроизводят явления, происходящие в реальных устройствах.*

*Различают элементы: по числу зажимов (полюсов), по предназначению, по типу их описываемых уравнений и т.д..*

У каждого элемента электрической цепи можно выделить определенное число зажимов (полюсов), с помощью которых он соединяется с другими элементами. *Если элемент обладает одной парой зажимов, то его называют двухполюсником.* Примером могут служить источники энергии (за исключением управляемых и многофазных), резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы. *При наличии зажимов в количестве трех и более, элемент относят к многополюсным элементам.* К ним относятся триоды, трансформаторы, усилители и т.д.

По назначению все элементы электрической цепи условно можно разделить на активные и пассивные. *Активный элемент содержит в своей структуре источник электрической энергии. К пассивным элементам относятся те, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия.*

К основным характеристикам элементов цепи относятся их вольт-амперные, вебер-амперные и кулон-вольтные характеристики (ВАХ, ВБАХ, КлВХ), описываемые дифференциальными или алгебраическими уравнениями. *Если элементы описываются линейными дифференциальными или алгебраическими уравнениями, то они называются линейными, в противном случае они относятся к классу нелинейных.* При строгом рассмотрении, все элементы являются нелинейными. При возможности рассмотрения их как линейных, существенно упрощается математическое описание и анализ процессов, определяемых границами изменения характеризующих их переменных и их частот.

*Коэффициенты, связывающие переменные, их производные и интегралы в этих уравнениях, называются параметрами элемента.* Различают элементы с сосредоточенными и с распределенными параметрами.

*Элементом с сосредоточенными параметрами называется элемент, у которого параметры не являются функциями пространственных координат, определяющих его геометрические размеры.* В свою очередь сосредоточенные параметры элементов могут быть постоянными и переменными.

*Если элемент описывается уравнениями, в которые входят пространственные переменные, то он относится к классу элементов с распределенными параметрами* (например, линия передачи электроэнергии (длинная линия)).

Как и большинство систем, электрические цепи можно различать и классифицировать по различным признакам.

*Основное разделение электрических цепей производится в зависимости от типа обрабатываемого колебания.* Колебания могут быть аналоговые, дискретные и цифровые.

*Аналоговым называется колебание, непрерывное во времени.* *Дискретным называется колебание, дискретное по времени и непрерывное*

по состоянию. **Цифровым** называется колебание, дискретное как по времени, так и по состоянию. Поэтому различают аналоговые, дискретные и цифровые электрические цепи.

В ТЭЦ рассматриваются, в основном, аналоговые ЭЦ. В свою очередь, аналоговые ЭЦ дополнительно классифицируют по следующим признакам:

- **по роду тока:** постоянного тока, переменного тока, синусоидальные, несинусоидальные.

- **по числу фаз:** однофазные, трехфазные.

- **по характеристикам элементов:** линейные (в них все элементы линейные), нелинейные (содержат хотя бы один нелинейный элемент); электрические цепи с сосредоточенными и с распределенными параметрами.

- **по способу соединения потребителей:** разветвленные, неразветвленные.

### **3. Основные элементы электрических цепей: источники тока и напряжения, резистор, конденсатор, катушка индуктивности.**

Все элементы электрических цепей можно представить как идеальные (идеализированные) элементы. *Идеальные (идеализированные) элементы учитывают явления, происходящие в реальной электрической цепи.*

Существует два вида идеальных источников электрической энергии: **идеальный источник напряжения (ЭДС)** и **идеальный источник тока** (рисунок 2).

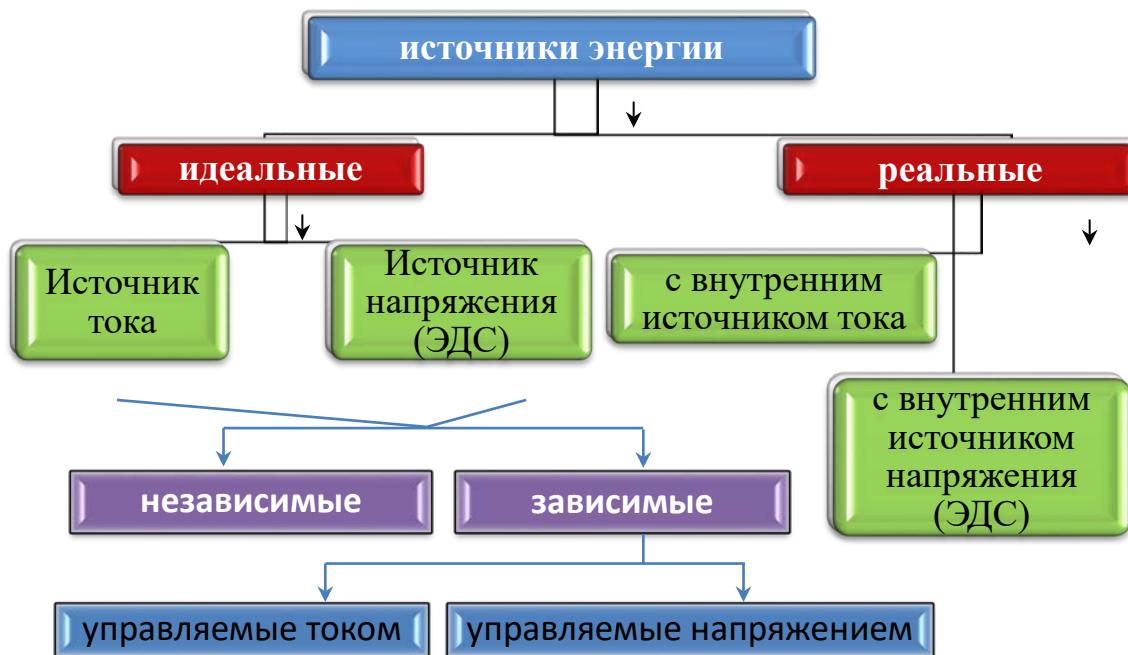


Рисунок 2 – Различие источников энергии

**Идеальным источником напряжения (ИН)** называется двухполюсный элемент - источник энергии, напряжение на зажимах которого не зависит от проходящего через него электрического тока (рисунок 3, а). У идеального

*ИН внутреннее сопротивление бесконечно мало, поэтому напряжение на его зажимах при изменении нагрузки не изменяется, изменяется лишь ток.*

**Идеальным источником тока (ИТ)** называется двухполюсный элемент - источник энергии, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах (рисунок 3, б). У идеального ИТ внутреннее сопротивление бесконечно велико, поэтому при изменении нагрузки ток ИТ не изменяется, изменяется только напряжение на его зажимах.

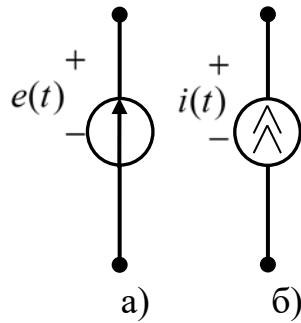


Рисунок 3 – УГО идеальных источников

Величины внутренних сопротивлений учтены в их УГО: закоротка в кружке идеального ИН и разрыв – у идеального ИТ. Однако, идеальных устройств не существует. Каждый из источников обладает конечным значением сопротивлений, для ИН оно имеет небольшое значение, для ИТ – большое (рисунок 4).

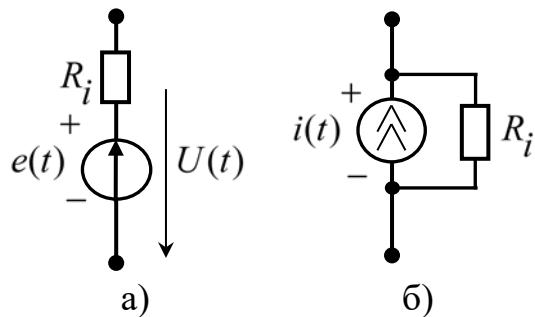


Рисунок 4 – УГО реальных источников

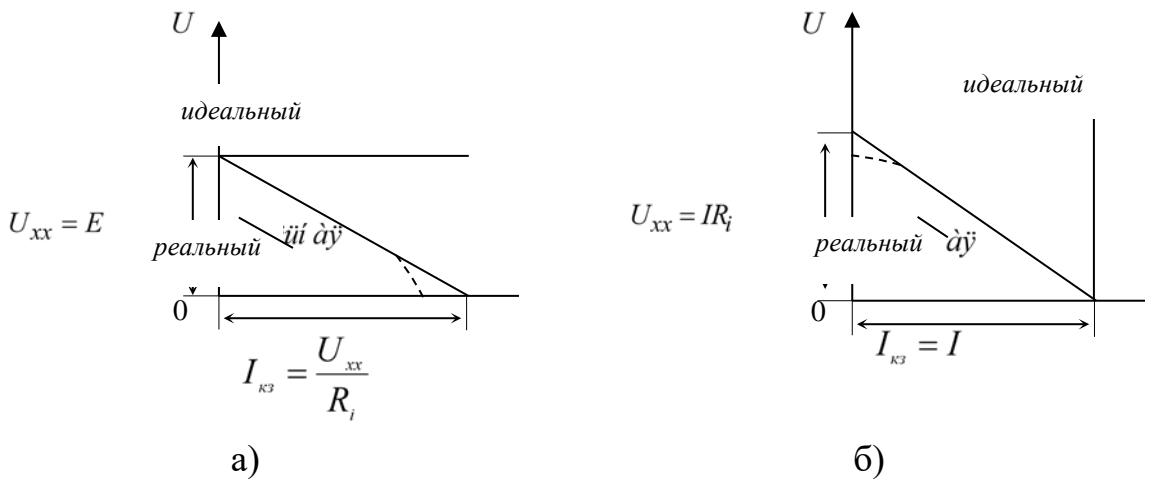
ВАХ идеального и реального источников напряжения (ЭДС) и тока приведены на рисунке 5.

Из рисунка 5,а видно, что чем меньше внутреннее сопротивление  $R_i$  источника, тем больше ток короткого замыкания и большее мощность ИН (источника ЭДС).

Из рисунка 5,б видно, что при увеличении сопротивления цепи, подключенной к идеальному источнику тока, напряжение на его зажимах и, соответственно, мощность, развиваемая им, также неограниченно возрастают.

Значит, чем больше  $R_i$  источника, тем больше напряжение на разомкнутых зажимах и тем больше мощность источника тока.

ВАХ реальных источников пересекает обе координатные оси и эти точки пересечения соответствуют нулевому току через источник и нулевому падению напряжения. Режим с нулевым током и ненулевым падением напряжения называется **холостым ходом**, а режим с нулевым падением напряжения и ненулевым током на выходе - **коротким замыканием**.



Различают три идеализированных приемных элемента ЭЦ: **резистивный элемент, индуктивный элемент и емкостной элемент** (рисунок 6).

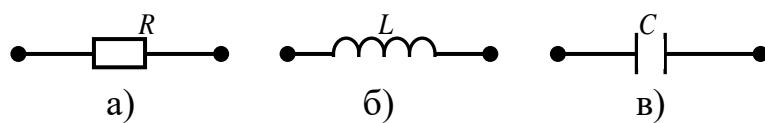
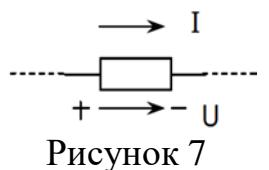


Рисунок 6 – УГО идеализированных пассивных элементов ЭЦ

**Резистивный элемент** - идеализированный двухполюсный элемент ЭЦ, характеризующий преобразование электромагнитной энергии в любой другой вид энергии, т. е. обладающий только свойством необратимого рассеяния энергии (рисунок 6, а).

Особенности элемента:

- 1) Ток, протекающий через элемент, направлен от высокого к низкому потенциалу.
- 2) В результате протекания тока наблюдается падение напряжения (уменьшение потенциала).



Величина падения напряжения является положительным при направлении его от высокого к низкому потенциалу.

- 3) Обладает **сопротивлением**  $R$ , которое определяется удельным сопротивлением  $\rho$  материала, длиной  $l$  и сечением  $S$  проводника:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (6)$$

Измеряют **в омах (Ом)**, возможны значения в  $k\text{Ом}$  ( $10^3 \text{ Ом}$ ),  $M\text{Ом}$  ( $10^6 \text{ Ом}$ ). Графически сопротивление определяется по ВАХ (рисунок 8) крутизной изменения тока при изменении напряжения:

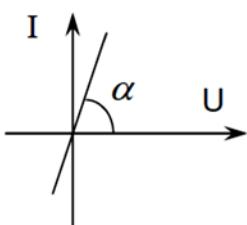


Рисунок 8 – ВАХ  
линейного резистивного  
элемента

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I}{U} = \frac{1}{R} \quad (7)$$

Величина, обратная сопротивлению называется **проводимостью**:

$$G = \frac{1}{R} \quad (8)$$

Измеряется **в сименсах (См)**.

4) Резистивный элемент является безынерционным элементом, так как изменение тока и напряжения на элементе происходят без запаздывания.

Данный элемент используется в качестве нагрузки активных устройств, в схемах фильтрации, в качестве дополнительного времязадающего элемента (задание постоянной времени), для перераспределения уровня потенциала в схеме и т.д..

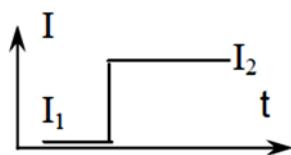
Реальный резистивный элемент называется **резистором**.

**Индуктивный элемент** - идеализированный двухполюсный элемент ЭЦ, характеризующий запасаемую в цепи энергию магнитного поля (рисунок 6,б).

Особенности элемента:

1) По физической природе элемент является динамическим. Падение напряжения на нем возникает только тогда, когда изменяется протекающий через него ток:  $\frac{di}{dt} \neq 0 \Rightarrow u_L \neq 0$ . В статическом режиме при подаче постоянного тока напряжения на элементе не будет.

2) Элемент – инерционный, т.к. при подаче напряжения ток через него не может изменяться скачкообразным способом:



$$\frac{di}{dt} \rightarrow \infty \Rightarrow u_L \rightarrow \infty.$$

Рисунок 9

3) Численный параметр, характеризующий элемент – **индуктивность**, который определяет величину магнитного потока, создаваемого протекающим током:

$$L = \frac{\Phi}{i}, \quad (9)$$

где  $\Phi = \int_S \bar{B} d\bar{s}$ , измеряемая в веберах (Вб),  $\bar{B}$  - магнитная индукция - в теслах (Тл),  $\bar{s}$  - площадь. Индуктивность измеряется **в генри (Гн)**, возможны значения в  $мГн$  ( $10^{-3}$  Гн),  $мкГн$  ( $10^{-6}$  Гн).

4) Скорость изменения магнитного потока определяет величину напряжения на индуктивности

$$u_L = \frac{d\Phi}{dt}, \quad u_L = L \frac{di}{dt}. \quad (10)$$

Следовательно, индуктивность является мерой инертности данного элемента относительно изменений протекающего тока.

Индуктивные элементы имеют ограниченное применение и используются в фильтрующих элементах, а также в качестве элементов высокочастотной «развязки».

Реальный индуктивный элемент – **катушка индуктивности**.

**Емкостной элемент** – идеализированный двухполюсный элемент ЭЦ, характеризующий запасаемую в цепи энергию электрического поля (рисунок 6, в).

*Особенности элемента:*

1) Элемент является накопителем электрической энергии. При подведении к двум электродам разности потенциалов  $U = \varphi_2 - \varphi_1$  на них накапливаются равные по величине и противоположные по знаку заряды  $\pm q$ . Между разнесенными зарядами в пространстве создается электрическое поле. Величина потока  $\Phi_E$  электрической индукции  $D$  через замкнутую поверхность  $S$  определяется зарядом, заключенным внутри объема, ограниченного данной поверхностью  $\Phi_E = \oint D ds = q$ .

2) Численный параметр, характеризующий элемент, - **электрическая емкость**, определяющая величину потока электрической индукции, создаваемого данной разностью потенциалов:

$$C = \frac{\Phi_E}{U} = \frac{q}{U}. \quad (11)$$

Емкость измеряется **в фарадах (Ф)**, возможны значения в  $мФ$  ( $10^{-3}$  Ф),  $мкФ$  ( $10^{-6}$  Ф),  $нФ$  ( $10^{-9}$  Ф),  $пФ$  ( $10^{-12}$  Ф).

3) Емкостной элемент по физической природе является динамическим, т.к. реагирует на изменение приложенного напряжения. Ток в емкостном элементе есть следствие изменения электрического заряда на нем:

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (12)$$

Ток через элемент появляется только при изменении приложенного напряжения  $\frac{du}{dt} \neq 0 \Rightarrow i_c \neq 0$ . В статическом режиме при постоянном напряжении ток отсутствует.

4) Элемент – инерционный, т.к. напряжения на нем не может измениться скачкообразным способом:

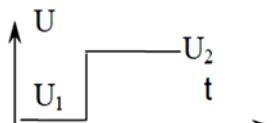


Рисунок 10

$$\frac{du}{dt} \rightarrow \infty \Rightarrow i_c \rightarrow \infty.$$

Реальный емкостной элемент называется **конденсатором**.

Рассмотрим реальные пассивные элементы ЭЦ.

**Резистор** в реальности, помимо своего основного параметра – сопротивления, имеет в наличии еще и *паразитные характеристики* – *емкость и индуктивность*. Емкость возникает между участками резистора и расположенными рядом другими элементами схемы, а индуктивность – это способность резистора запасать энергию магнитного поля, например на зажимах или выводах. Классификация резисторов приведена на рисунке 2.20.

*Основные параметры резисторов:*

1) **Номинальное сопротивление** указывается в соответствии со стандартными рядами сопротивлений -  $E_n$ :  $E6, E12, E24, E48, E96, E192$ . Ряды  $E$  соответствуют геометрической прогрессии со знаменателем  $q_n = \sqrt[6]{10}$ . Номинальное значение сопротивления указывают умножением величины ряда на порядковую величину  $10^m$ , где  $m = 0, 1, 2, \dots$ .

В случае  $E6 \rightarrow q_6 = \sqrt[6]{10} = 1,47$ , тогда ряд состоит из величин: 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8 и т.д.

2) Величина погрешности или **допустимое отклонение сопротивления** резистора от номинального значения:

$$\pm \frac{\Delta R}{R} \%$$

Возможные погрешности: 2%, 5%, 10%, 20%.

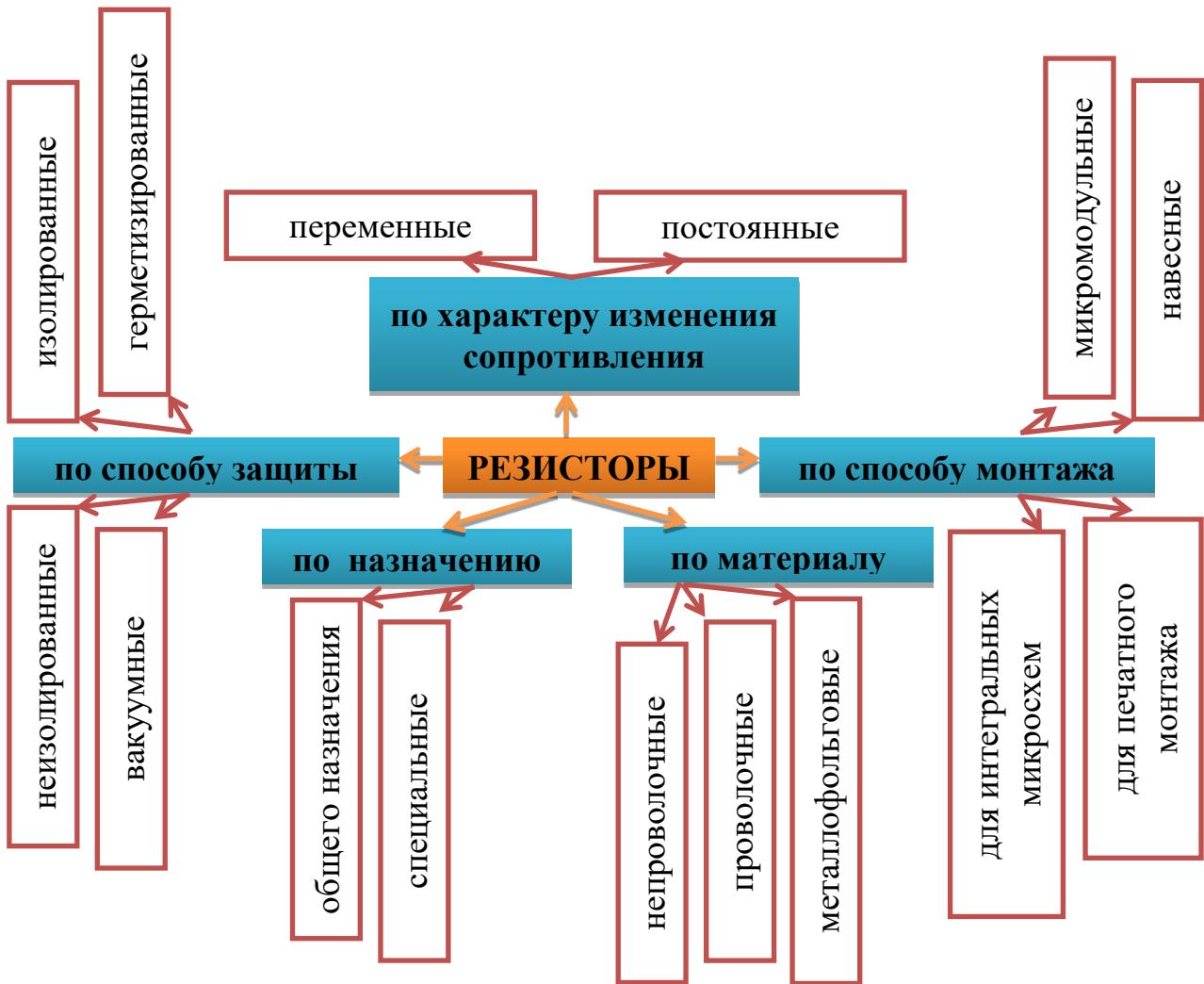


Рисунок 11 – Классификация резисторов

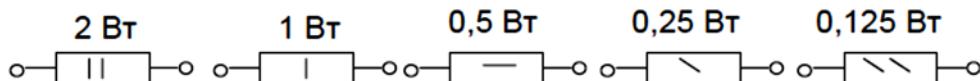


Рисунок 12

3) **Номинальная мощность рассеивания**, параметр определяющий размеры резистора, – это максимальная мощность, которую может рассеивать резистор без изменения своих параметров.

4) **Температурный коэффициент сопротивления**, определяющий изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1 градус, равен

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t} \cdot 100 \frac{\%}{\text{град}} \quad (13)$$

В технической документации при задании номинальных значений резисторов обязательно приводятся его основные параметры, например  $0,25 \text{ Вт} - 100 \text{ к}\Omega \pm 2\%$ . Обычно на корпусе резистора применяют

кодированное обозначение или цветовую маркировку. Цветную маркировку наносят на малогабаритные резисторы в виде нескольких цветных полосок (рисунок 13).

Резисторы. Цветовая маркировка						
Цвет полосы (цена)	1-я злёт	2-я злёт	3-я злёт	Множитель	Допуск, рад	ТКС, $^{\circ}\text{C}$
Золотой				0,01 $\Omega$	5%, E24	
Серебряный				0,1 $\Omega$	10%, E12	
Черный	0	0	0	1 $\Omega$	20%, E6	
Коричневый	1	1	1	10 $\Omega$	1%, E96	100
Красный	2	2	2	100 $\Omega$	2%, E48	50
Оранжевый	3	3	3	1k $\Omega$		15
Желтый	4	4	4	10k $\Omega$		25
Зеленый	5	5	5	100k $\Omega$	0,5%, E192	
Голубой	6	6	6	1M $\Omega$	0,25%	10
Фиолетовый	7	7	7	10M $\Omega$	0,1%	5
Серый	8	8	8	100M $\Omega$	0,05%	
Белый	9	9	9			1

Пример обозначения  
2 кОм ±1%

10 кОм ±2%  
100‰/°C

2 кОм ±5%

100 Ом ±10%

Рисунок 13 – Цветовая маркировка резисторов

Кодированное обозначение номинального значения сопротивления содержит *цифры и букву*. Буква соответствует десятичному множителю, на

который умножается цифровое обозначение (таблица 1). После номинала стоит буква, обозначающая отклонение в % (таблица 2).

Таблица 1

<i>Буква</i>	<b>R</b>	<b>K</b>	<b>M</b>	<b>G</b>	<b>T</b>
<i>Множитель</i>	1	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$

Таблица 2

<i>Отклонение</i>	$\pm 0,001$	$\pm 0,002$	$\pm 0,005$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,05$
<i>Буква</i>	<b>E</b>	<b>L</b>	<b>R</b>	<b>P</b>	<b>U</b>	<b>X</b>
<i>Отклонение</i>	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 5$
<i>Буква</i>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>I</b>
					<b>K</b>	<b>M</b>
						<b>N</b>

**Конденсатор** – это реальный емкостной элемент, который также обладает паразитными величинами: индуктивностью и сопротивлением. Классификация конденсаторов приведена на рисунке 14.

Основные параметры конденсаторов:

- 1) **Номинальная емкость** конденсатора, аналогично резистору может иметь стандартные значения.
- 2) **Допустимое отклонение** от номинального значения:

$$\frac{C - C_0}{C_0} \cdot 100\%.$$

### 3) **Температурный коэффициент емкости**

$$TKE = \frac{\Delta C}{C_0 \Delta t} \cdot 100 \frac{\%}{град}. \quad (14)$$

4) **Номинальное рабочее напряжение** – значение максимального напряжения, при котором конденсатор сохраняет параметры в течение заданного времени наработки.

Существует еще ряд дополнительных параметров: **сопротивление изоляции** и **тангенс угла потерь**. Сопротивление изоляции – это сопротивление конденсатора постоянному току. Угол диэлектрических потерь или коэффициент рассеивания (добротность) – это угол, дополняющий угол сдвига фаз между током и напряжением, при протекании переменного тока через конденсатор.

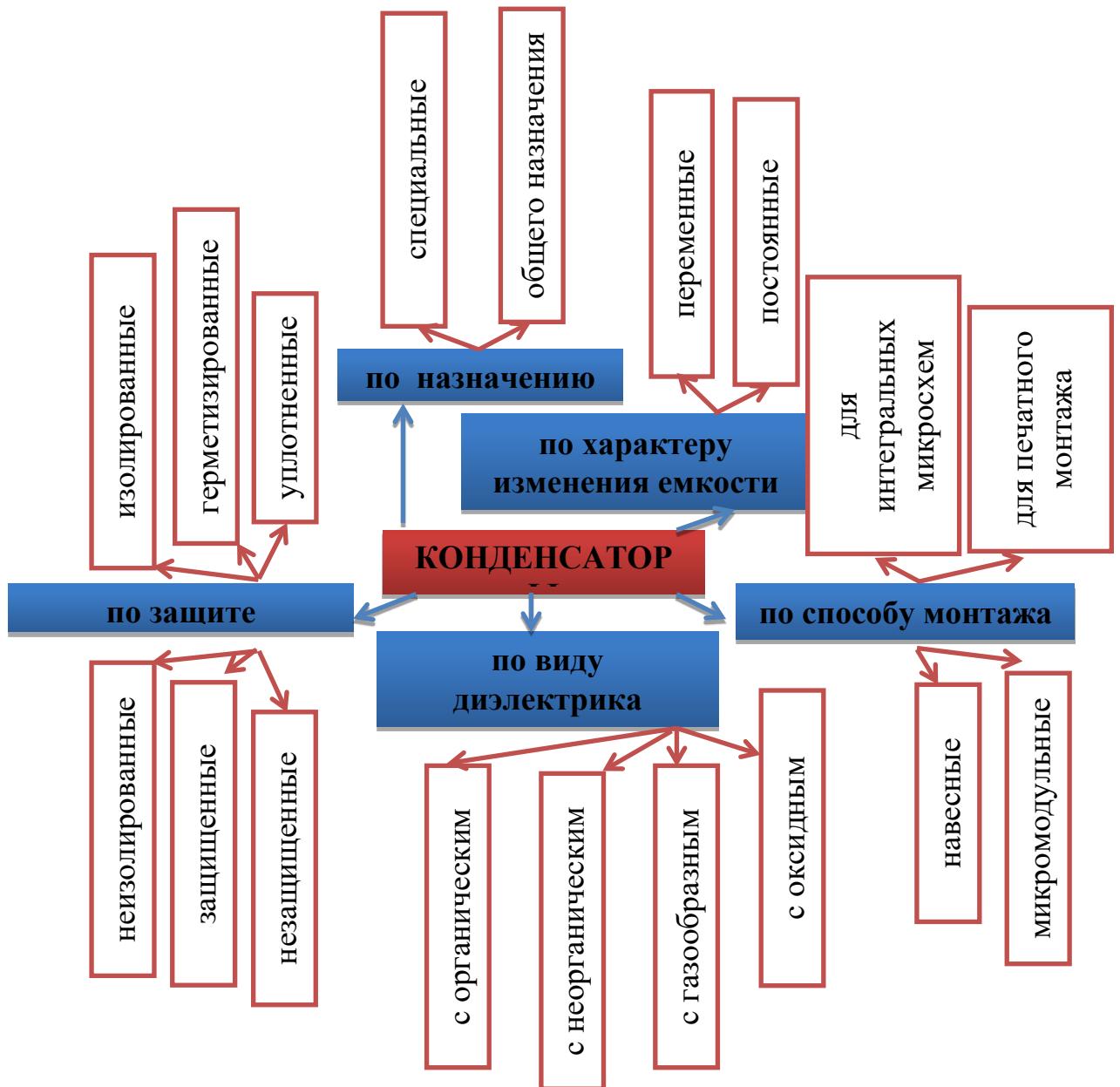


Рисунок 14 – Классификация конденсаторов

Номинальная емкость маркируется цифрами и буквой, которая определяет десятичный множитель (таблица 3). При задании номинального значения емкости конденсатора обязательно указываются емкость, допустимое отклонение и ТКЕ, например  $100n\Phi \pm 10\% M$ .

Таблица 3

Размерность	Фараd, $\Phi$	Мили-фараd, $m\Phi$	Микро-фараd, $\mu\Phi$	Нано-фараd, $n\Phi$	Пико-фараd, $p\Phi$
Буква	$F$	$m$	$\mu$	$n$	$p$
Множитель	1	$10^{-3}$	$10^{-6}$	$10^{9-9}$	$10^{-12}$

Номинальные напряжения и их кодированные обозначения приведены в таблице 4.

Таблица 4

<i>Номинальное напряжение, В</i>	<i>Код</i>	<i>Номинальное напряжение, В</i>	<i>Код</i>	<i>Номинальное напряжение, В</i>	<i>Код</i>
1,0	<b>I</b>	20	<b>F</b>	160	<b>Q</b>
1,6	<b>P</b>	32	<b>H</b>	200	<b>Z</b>
2,5	<b>M</b>	40	<b>S</b>	250	<b>W</b>
3,2	<b>A</b>	50	<b>J</b>	315	<b>X</b>
4,0	<b>C</b>	63	<b>K</b>	350	<b>T</b>
6,3	<b>B</b>	80	<b>L</b>	400	<b>Y</b>
10	<b>D</b>	100	<b>N</b>	450	<b>U</b>
16	<b>E</b>	125	<b>P</b>	500	<b>V</b>

В технической документации при задании номинальных значений конденсаторов обязательно приводятся его основные параметры, на корпусе применяют *кодированное обозначение* или *цветовую маркировку* (рисунок 15).

Условное обозначение конденсаторов может быть сокращённым или полным, которое состоит из букв и цифр.

*Первый элемент* - буква или сочетание букв, обозначающее подкласс конденсатора: *K* - постоянной ёмкости, *KT* – подстроечные, *KП* - переменной ёмкости.

*Второй элемент* - обозначение группы конденсатора в зависимости от материала диэлектрика.

*Третий элемент* - пишется через дефис и обозначает регистрационный номер конкретного типа конденсатора (в составе может быть буквенное обозначение: *KД* - конденсаторы дисковые, *KМ* - керамические монолитные, *KЛС* - керамические литые секционные и т.д.).

*Параметры и характеристики*, входящие в полное условное обозначение, указываются в следующей последовательности:

1. Обозначение конструктивного исполнения
2. Номинальное напряжение
3. Номинальная ёмкость
4. Допускаемое отклонение ёмкости
5. Группа и класс по температурной стабильности ёмкости
6. Номинальная реактивная мощность
7. Другие, необходимые дополнительные характеристики.

Конденсаторы. Цветовая маркировка						
Цвет награда (знач)	1-й элемент	2-й элемент	3-й элемент	Множитель	Доводка рад	ТКЕ
Золотой				0,01pF	5%, E24	Коричневый
Серебряный				0,1pF	10%, E12	
Черный		0	0	1pF	20%, E6	ПМО Н10
Коричневый	1	1	1	10pF	1%, E96	M33
Красный	2	2	2	100pF	2%, E48	M75 Н20
Оранжевый	3	3	3	1nF		M150
Желтый	4	4	4	10nF		M220
Зеленый	5	5	5	100nF	0,5%, E192	M330 Н30
Голубой	6	6	6	1μF	0,25%	M470 Н50
Фиолетовый	7	7	7	10μF	0,1%	M750 Н70
Серый	8	8	8	0,01pF	0,05%	
Белый	9	9	9	0,1pF		H90

The diagram illustrates four examples of capacitor markings:

- 2 пФ, ±2%, М33**: A blue capacitor with markings 2, 0, 0, 3, 3.
- 18 пФ, ±5%, МПО**: An orange capacitor with markings 1, 8, 0, 7, 0.
- 22 нФ, Н90**: A red capacitor with markings 2, 2, 0, 9, 0.
- 0,1 мкФ**: A yellow capacitor with markings 0, 1, 0, 0, 0.

Рисунок 15 – Цветовая маркировка конденсаторов

#### 4. Электрические схемы. Основные определения

Для произведения количественных расчетов необходимо представить ЭЦ в виде некоторой математической модели, называемой **электрической схемой (ЭС)**.

**Электрическая схема** представляет собой графический конструкторский документ, на котором при помощи условных графических обозначений (УГО) изображены электрические составные части ЭЦ или

некоторого объекта и связи между ними. Все элементы ЭЦ в УГО и ЭС выполняются в соответствии с требованиями общепринятых стандартов.

ЭС классифицируются по четыре основные группы (рисунок 16).



Рисунок 16 – Классификация электрических схем

**Схемы группы 1** предназначены для общего ознакомления с электрическими составными частями объекта и изучения общих принципов их работы и взаимосвязей. В нее входят: **структурная и функциональная ЭС**. Эти схемы разрабатываются при проектировании на стадиях, предшествующих разработке схем других групп.

**Структурная схема** - определяет составные части ЭЦ, их назначение и взаимосвязи.

**Функциональная схема** - разъясняет определенные процессы, протекающие в определенных функциональных частях (элемент, устройство или функциональная группа, имеющая в ЭЦ строго определенное функциональное назначение) или в ЭЦ в целом.

**Схемы группы 2** предназначены для определения полного состава и подробного изучения принципов работы ЭЦ, а также для его расчета. Эти схемы служат основанием для разработки других конструкторских документов, в частности чертежей, а также схем групп 3 и 4. Их используют при наладке, регулировке, контроле, эксплуатации и ремонте изделий.

Бывают **принципиальные и эквивалентные схемы**.

**Принципиальная схема** - определяет полный состав элементов и связей между ними и дающая детальное представление о принципах работы ЭЦ. Все элементы представлены с реальными характеристиками.

**Эквивалентная схема** - предназначена для анализа и расчета параметров (характеристик) ЭЦ или его функциональных частей. Причем данная схема состоит из идеализированных элементов и называется **схемой замещения**. Реальные элементы заменены максимально близкими по функциональности цепями из идеальных элементов.

**Схемы группы 3** предназначены для представления сведений об электрических соединениях составных частей цепи или ЭЦ в целом. Подразделяется на: **схему соединений; схему подключений и общую схему**. Данные схемы используют при разработке конструкторских документов, прежде всего чертежей, определяющих прокладку и способы крепления проводов, жгутов, кабелей в объекте, а также для осуществления присоединений и при наладке, контроле, эксплуатации объектов.

**Схема соединений** показывает электрические соединения отдельных составных частей цепи и определяющая провода, жгуты и кабели для осуществления этих соединений, а также места их присоединения и ввода (зажимы, разъемы, проходные изоляторы и т. д.).

**Схема подключения** показывает внешние подключения цепи.

**Общая схема** определяет составные части комплекса и электрические соединения их между собой на месте эксплуатации.

**Схемы группы 4** предназначены для определения относительного расположения объектов (ЭЦ) или составных частей объекта. Основными видами данной группы являются **схема электрооборудования и схема электроснабжения и связи**. Их используют при разработке других конструкторских документов, а также при изготовлении и эксплуатации объектов.

**Схема электрооборудования** проводки на планах определяет относительное расположение составных частей объекта в зданиях и сооружениях.

**Схема электроснабжения и связи** определяет относительное расположение составных частей объекта на местности.

В теории электрических цепей мы имеем дело со схемами группы I и II. На рисунке 17 представлены примеры структурной (а), принципиальной (б) и эквивалентных схем (в).

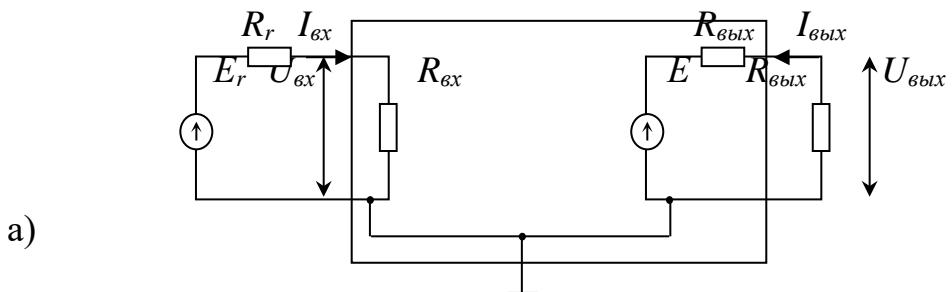


Рисунок 17 – Схемы  $RC$  – усилительного каскада

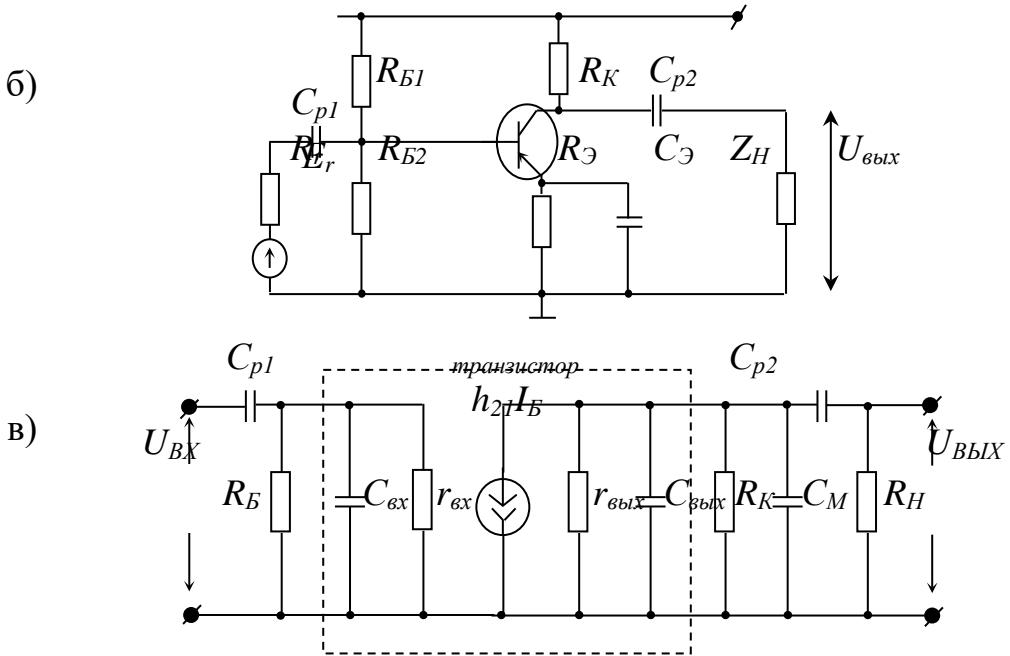


Рисунок 17 – Схемы  $RC$  – усилительного каскада

## 5. Понятие о компонентных и топологических уравнениях. Граф. Виды. Изоморфные и гомеоморфные графы. Подграфы. Топологические матрицы.

Математическое описание процессов в электрических цепях (ЭЦ) базируется на уравнениях двух типов: **компонентных и топологических**. **Компонентные уравнения** (или уравнения ветвей) устанавливают связь между током и напряжением в каждой ветви. Так как топология показывает геометрическую структуру ЭЦ, то **топологические уравнения** отражают свойства цепи, которые определяются только ее топологией и не зависят от того, какие электрические элементы входят в состав ветвей. При составлении компонентных уравнений используют законы Ома, а для топологических уравнений – законы Кирхгофа.

Основными задачами топологии цепей являются:

- ✓ Определение числа независимых узлов и контуров;
- ✓ Выделение систем соответствующих узлов и контуров.

*Системой независимых узлов и системой независимых контуров* называются совокупности узлов и контуров цепи, для которых можно составить системы линейно независимых уравнений по законам Кирхгофа.

Основным понятием в топологии электрических цепей является **граф**.

Граф – графическое представление ЭЦ, в которой все ветви заменены линиями. Иначе говоря, **графом** называется геометрическая структура цепи, которая представлена совокупностью отрезков произвольной длины и формы, называемых ветвями (ребрами), и точек их соединения, называемых узлами (вершинами) (рисунок 18).

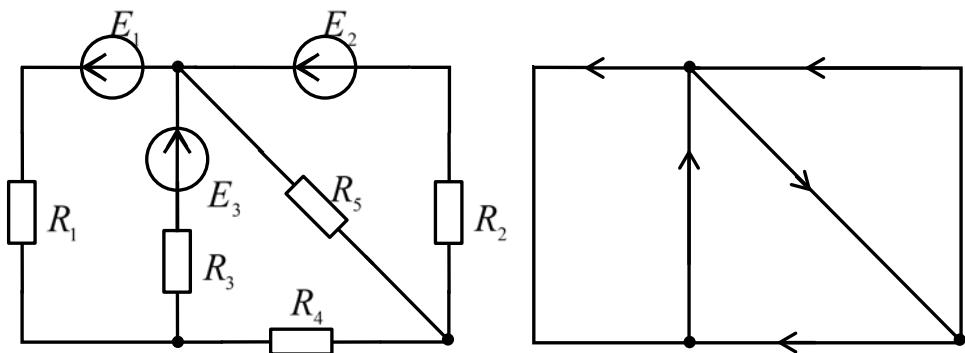


Рисунок 18 – Электрическая цепь и соответствующий ей граф

Граф подразделяются на два вида: **топологический и направленный граф прохождения сигналов**. **Топологический граф** является упрощенной моделью электрической цепи, отражающей только ее топологические (структурные) свойства. **Направленный граф прохождения сигналов или сигнальный граф** – является графическим изображением системы уравнений, описывающих процессы в электрической цепи.

Мы рассмотрим только топологические графы.

Топологический граф (далее «граф») ЭЦ строят по ее эквивалентной схеме. При построении графов необходимо указывать стрелкой для каждой ветви определенное направление, такие графы называются *направленные или ориентированные*. При указании направлений ветвей обычно выбирают направления истинных токов в данных ветвях. Свойства графа не зависят от формы и длины ветвей, а также от взаимного расположения узлов графа на плоскости и определяются только числом ветвей  $n$ , числом узлов  $m$  и способом соединения ветвей между собой.

*Графы, имеющие одинаковые количества узлов и ветвей, соединенных между собой одинаковым образом, называются изоморфными* (рисунок 19). Изменяя длину и форму ветвей, а также взаимное расположение узлов графа на плоскости, можно получить бесчисленное множество графов, изоморфных исходному. Такие преобразования графа называются *изоморфными преобразованиями*. Каждый из вариантов изображения графа, полученный такими преобразованиями, называется его *геометрической реализацией*.

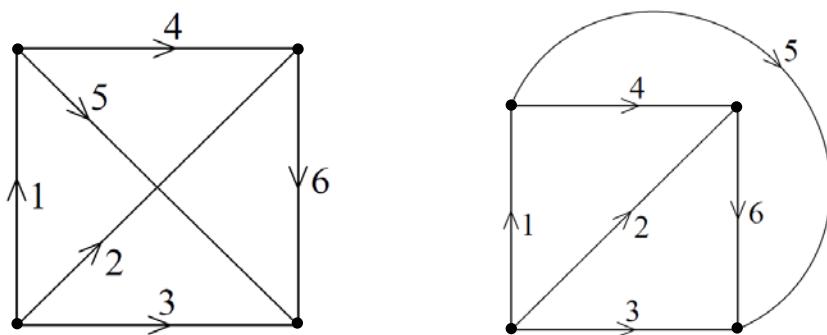


Рисунок 19 – Изоморфные графы

Если некоторый узел  $i$  является концом или началом некоторой ветви  $j$ , тогда говорят что они ( $i$  и  $j$ ) **инцидентны**. Таким образом, любая ветвь инцидентна двум узлам.

**Степенью узла** называется число ветвей графа, инцидентных данному узлу. Графы изоморфные с точностью до узлов второй степени, называют **гомеоморфными**. После удаления из гомеоморфных графов узлов второй степени и объединение инцидентных этим вершинам ветвей гомеоморфные графы становятся изоморфными.

Графы, соответствующие расширенному и сокращенному топологическому описанию ЭЦ, являются **гомеоморфными**.

При изображении графы могут быть плоскими и объемными, в соответствии с этим они подразделяются на **планарные и непланарные**. **Планарный граф** – это граф, который в результате изоморфных преобразований может быть изображен на плоскости без пересечения ветвей. Планарными являются все графы, содержащие не более 4-х узлов. **Непланарный граф** – это граф, который не может быть изображен на плоскости без пересечения ветвей. Примеры таких графов изображены на рисунке 20.

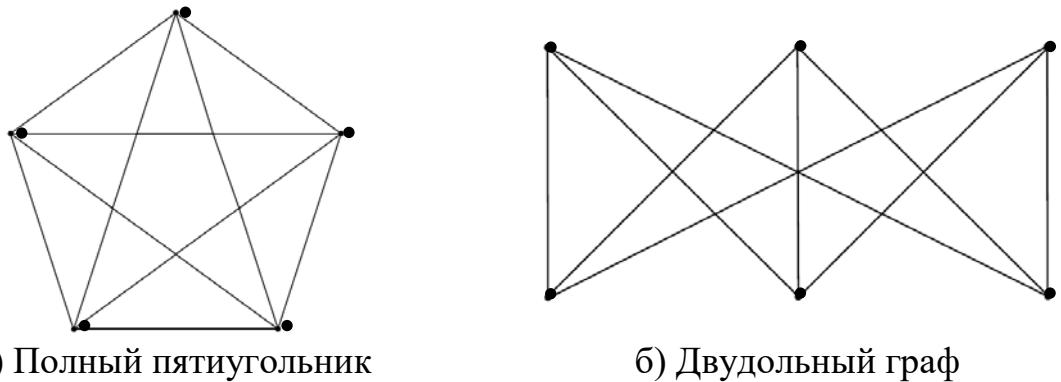


Рисунок 20 – Графы Понtryгина-Куратовского

Произвольный граф является планарным тогда и только тогда, когда он не содержит частей, гомеоморфных одному из графов Понtryгина-Куратовского.

Планарный граф делит плоскость, на которой он изображен на **внешнюю** и **внутренние области**. Внутренние области, ограниченные ветвями графа, называются **ячейками** или **окнами** графа. Внешняя, по отношению к графу, часть плоскости называется **базисной ячейкой**.

Свойства графа не зависят от формы и длины ветвей, а также от взаимного расположения узлов графа на плоскости и определяются только числом ветвей  $n$ , числом узлов  $t$  и способом соединения ветвей между собой.

**Подграфы.** Любая часть графа, элементы которой являются элементами исходного графа, называется **подграфом**. Подграф можно получить путем удаления отдельных ветвей исходного графа. Одна ветвь или

один узел графа, а также любое множество ветвей и узлов, содержащихся в данном графе может быть подграфом. В теории электрических цепей большое значение имеют такие подграфы, как **путь**, **контур**, **дерево**, **ветви связи** и **сечение графа**.

**Путь** - это упорядоченная последовательность ветвей в которой каждые две соседние ветви имеют общий узел, причем каждая ветвь и каждый узел встречаются на этом пути только один раз. Узлы, которые соединены путем графа, называются концевыми.

Замкнутый путь, у которого начальный и конечный концевые узлы совпадают, называют **контуром**. Каждому из узлов контура инцидентны две ветви этого контура.

Если любые два узла графа соединены путем, то граф называют **связанным** (связанным). В противном случае граф называют **несвязанным**.

Связный подграф, содержащий все узлы графа, но не содержащий ни одного контура, называют **деревом** этого графа. Ветви графа, вошедшие в дерево, называются **ветвями дерева**.

Ветви, не вошедшие в дерево, называются **ветвями связи (связями)** или **хордами** этого дерева. Ветви связи дополняют дерево до полного графа. Если  $m$  - число узлов,  $n$  - число ветвей, то число ветвей дерева  $\delta = m - 1$ , а число ветвей связи  $c = n - (m - 1) = n - m + 1$ . Ветви дерева изображают жирными линиями, а ветви связи – тонкими. Для каждого графа можно образовать несколько деревьев, отличающихся друг от друга составом ветвей дерева (рисунок 20, б).

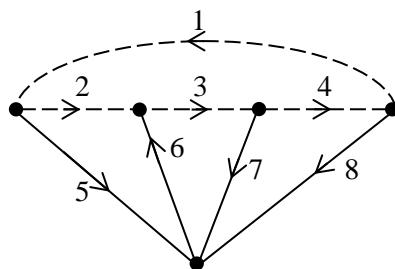


Рисунок 21 – Подграфы электрической цепи:  
дерево (линии) и ветви связи (пунктир)

Для построения дерева необходимо наметить узлы графа. Затем, начав с некоторого узла, называемый **корнем**, вычерчивать ветви дерева, соединяющие другие узлы графа, не допуская при этом образования контуров.

Добавление к дереву графа любой ветви связи образует контур. Контуры, образованные поочередным добавлением к дереву графа его ветвей связи, называются **главными контурами**.

Число главных контуров равно числу ветвей связи. Номера главных контуров обозначают римскими цифрами. За направление обхода контура принимают направление ветви связи этого контура.

**Сечением графа** называют систему или множество ветвей, удаление которых разбивает граф на два несвязных подграфа, каждый из которых

является связным. В частном случае один из этих подграфов может быть изолированным узлом.

Сечение можно изобразить в виде следа некоторой замкнутой поверхности, которая охватывает часть цепи с одним или несколькими узлами. Ни одна из ветвей графа не пересекается дважды.

**Главным сечением графа** называется такое сечение, в которое входит только одна ветвь выбранного дерева. Остальные ветви, входящие в главное сечение, являются ветвями связи. Количество главных сечений равно количеству ветвей дерева. За положительное направление главного сечения принимают направление ветви дерева, входящей в данное сечение, и указывают стрелкой. На рисунке 22 изображены главные сечения  $S_1, S_2, S_3$  и  $S_4$  графа.

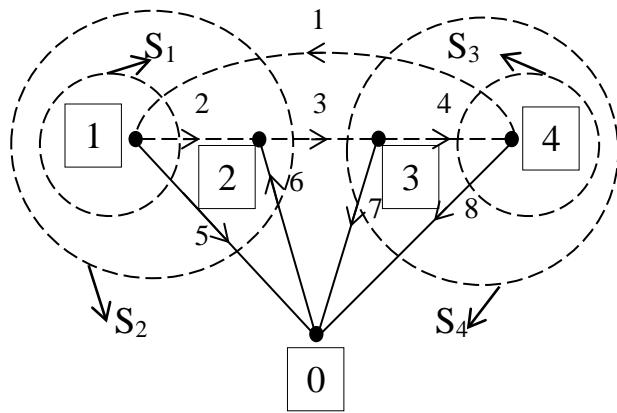


Рисунок 22 – Сечения графа

**Топологические матрицы.** Для аналитического описания структуры электрической цепи, ее графа и основных законов распределения токов применяют топологические матрицы. Аналитическое представление графа необходимо для формирования уравнений сложной цепи с помощью компьютерных математических программ.

В соответствии с видом уравнений Кирхгофа различают три топологические матрицы: **соединений (узловую матрицу)  $[A]$ , контурную (главных контуров)  $[B]$  и главных сечений  $[Q]$ .**

Полное описание структуры направленного графа дает  $[m^* \times n]$  - **матрица соединений (узловая матрица)  $[A]$** , где  $m^* = m - 1$  ( $m$  - число узлов).  $m^*$  - строк матрицы являются порядковыми номерами узлов, а  $n$  - столбцов – номерами ветвей. Она представляет собой **таблицу коэффициентов уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для узлов схемы**.

Каждый элемент матрицы может принимать значения 0, +1 и -1:

✓ Элемент матрицы  $a_{ij}$ , расположенный на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца, равен +1, если ветвь  $j$  графа соединена с узлом  $i$  и направлена от узла.

✓ Элемент матрицы  $a_{ij} = -1$ , если ветвь  $j$  соединена с узлом  $i$  и направлена к узлу.

✓ Элемент матрицы  $a_{ij} = 0$ , если ветвь  $j$  не присоединена к узлу  $i$ .

**Матрица главных сечений**  $[Q]$  представляет собой таблицу коэффициентов, составленных по первому закону Кирхгофа для главных сечений. Строки матрицы  $[Q]$  соответствуют сечениям ( $s = n - m + 1$ ), столбцы – ветвям ( $n$ ), т.е. размерность матрицы будет  $[s \times n]$ .

Каждый элемент матрицы может принимать значения 0, +1 и -1:

✓ Элемент матрицы  $q_{ij} = +1$ , если ветвь  $j$  содержится в сечении  $i$  и ее ориентация совпадает с ориентацией сечения, т. е. ориентацией соответствующей ветви дерева относительно линии сечения.

✓ Элемент матрицы  $q_{ij} = -1$ , если ветвь  $j$  содержитя в сечении  $i$  и направлена противоположно направлению сечения.

✓ Элемент матрицы  $q_{ij} = 0$ , если ветвь  $j$  не содержитя в сечении  $i$ .

**Матрица главных контуров (контурная матрица)**  $[B]$  – это таблица коэффициентов уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа. Строки матрицы  $[B]$  соответствуют главным контурам ( $k = n - m + 1$ ), столбцы – ветвям ( $n$ ), т.е. размерность матрицы будет  $[k \times n]$ .

Каждый элемент матрицы может принимать значения 0, +1 и -1:

✓ Элемент матрицы  $b_{ij} = +1$ , если ветвь  $j$  содержитя в сечении  $i$  и направление ветви совпадает с направлением обхода контура.

✓ Элемент матрицы  $b_{ij} = -1$ , если ветвь  $j$  содержитя в сечении  $i$  и направление ветви противоположно направлению обхода контура.

✓ Элемент матрицы  $b_{ij} = 0$ , если ветвь  $j$  не содержитя в контуре  $i$ .

## Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение электрической цепи, ветви, узла и контура.
- 2 Объясните физический смысл, используемых физических величин в теории электрических цепей.
- 3 Расскажите об элементах электрических цепей.
- 4 Расскажите о различных схемах электрических цепей.
- 5 Опишите основные характеристики идеализированных источников энергии электрической цепи.
- 6 Опишите основные характеристики идеализированных и реальных пассивных элементов электрической цепи.
- 7 Сформулируйте основные понятия топологии цепей.
- 8 Опишите классификацию графов.
- 9 Опишите различные виды подграфов.
- 10 Объясните принцип построения топологических матриц.

## Литература

- 1 Алимгазинова Н.Ш. Теория Электрических Цепей. Курс Лекций. – Алматы: Қазақ университеті, 2016. – 8,7 п.л..
- 2 Манаков С.М., Алимгазинова Н.Ш., Бурисова Д.Ж., Исимова А.Т. Основы электротехники в упражнениях и задачах. – Алматы: Қазақ университеті, 2016. – 10 п.л..

3 Манаков С.М., Алимгазинова Н.Ш., Толегенова А.А. Учебно-Методическое Пособие По Курсу "Теория Электрических Цепей". – Алматы: Қазақ университеті, 2016. – 12 пл.

4 Теоретические основы электротехники. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: конспект лекций / С. Г. Иванова, В. В. Новиков. – Электрон. дан. (4 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008.

5 Атабеков Г. И. Основы теории цепей : учебник / Г. И. Атабеков . – 2-е изд., испр . – СПб. : Лань, 2006 . – 432 с.

6 Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. М: КОРОНА-Век, 2012. - 368 с.

7 Атабеков Г.И. Нелинейные электрические цепи. Теоретические основы электротехники. Учебное пособие. СПб.: Питер, Лань, 2010. – 432 с.

8 Бессонов Л.А. Электрические цепи. Теоретические основы электротехники. М: Юрайт, 2016. – 701 с.

9 Попов В.П. Основы теории цепей: Учебник для студ. вузов спец. Радиотехника. – М.: Высшая школа, 2000. – 574 с.