

**Электротехника**

## Раздел 1. Электрические цепи постоянного тока

1. Диэлектрики в электрическом поле
2. Проводники в электрическом поле
3. Электрический ток. Разновидности электрического тока
4. Электрический ток (направление и скорость электрического тока)
5. Электрическое сопротивление. Зависимость сопротивления от температуры
6. Приборы сопротивления
7. Электрическая цепь и ее элементы
8. Схема электрической цепи
9. Условные обозначения элементов электрических цепей
10. Закон Ома для участка электрической цепи. Закон Ома для замкнутой цепи
11. ЭДС источника электрической энергии
12. Режимы работы источника электрической энергии
13. Источники электрической энергии
14. Альтернативные источники электрической энергии
15. Тепловое действие электрического тока (закон Джоуля-Ленца)
16. Значения номинальных токов для проводов с резиновой изоляцией
17. Защита проводов от больших токов
18. Элементы электрических цепей. Первый закон Кирхгофа (Закон тока). Второй закон Кирхгофа (Закон напряжений)
19. Последовательное соединение приемников электрической энергии. Параллельное соединение приемников электрической энергии
20. Способы соединения источников ЭДС в батарее (последовательное соединение источников ЭДС)
21. Способы соединения источников ЭДС в батарее (параллельное соединение источников ЭДС)
22. Способы соединения источников ЭДС в батарее (смешанное соединение элементов)
23. Потенциальная диаграмма неразветвленной электрической цепи (1)
24. Потенциальная диаграмма неразветвленной электрической цепи (2)

25. Метод эквивалентного сопротивления
26. Взаимные преобразования треугольника и звезды сопротивлений
27. Методы расчета сложных цепей (метод уравнений Кирхгофа, метод узлового напряжения, метод контурных токов, метод эквивалентного генератора, метод наложения)
28. Вольт-амперные характеристики нелинейных электрических цепей. Графический метод расчета нелинейных электрических цепей (1)
29. Графический метод расчета нелинейных электрических цепей (2)

## **Раздел 2. Электрическое и магнитное поле**

30. Закон Кулона. Характеристики электрического поля
31. Конденсаторы. Конденсаторные батареи
32. Магнитная индукция. Магнитодвижущая сила (МДС). Напряженность магнитного поля. Магнитный поток
33. Направление линий магнитного поля
34. Действие магнитного поля на проводник с током
35. Закон полного тока
36. Магнитная цепь
37. Закон Ома для неразветвленной магнитной цепи. Закон Кирхгофа для магнитных цепей. Электромагнит
38. Расчет магнитных цепей (прямая задача расчета неразветвленной неоднородной магнитной цепи)
39. Явление электромагнитной индукции
40. Потокосцепление. Индуктивность. Взаимная индуктивность
41. Измерительные трансформаторы
42. Трансформаторы тока. Измерительные клещи

## **Раздел 3. Электрические цепи переменного тока**

43. Синусоидальный ток (основные понятия о переменном токе)
44. Получение синусоидальной ЭДС
45. Сложение синусоидальных величин. Графическое сложение по временной диаграмме

46. Сложение синусоидальных величин. Обоснование векторной диаграммы
47. Идеальные цепи переменного тока (цепь переменного тока с активным сопротивлением)
48. Идеальные цепи переменного тока (цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением)
49. Идеальные цепи переменного тока (цепь переменного тока с емкостным сопротивлением)
50. Последовательное соединение активного сопротивления и катушки индуктивности
51. Последовательное соединение активного сопротивления и конденсатора
52. Последовательное соединение активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора
53. Общий случай последовательного соединения элементов цепи переменного тока
54. Расчет разветвленной цепи переменного тока. Метод активных и реактивных составляющих токов
55. Расчет разветвленной цепи переменного тока. Метод проводимостей
56. Компенсация реактивной мощности
57. Общие сведения о комплексных числах
58. Выражение основных электрических величин комплексными числами

#### **Раздел 4. Цепи трехфазного тока и их расчет**

59. Трехфазная симметричная система ЭДС
60. Соединение обмоток генератора звездой
61. Соединение обмоток генератора треугольником
62. Симметричные трехфазные цепи
63. Порядок расчета симметричной трехфазной цепи
64. Расчет четырехпроводной трехфазной цепи при несимметричной нагрузке
65. Расчет несимметричной трехфазной цепи при соединении нагрузки треугольником
66. Аварийные режимы в трехфазных цепях
67. Мощность трехфазной цепи при симметричном и несимметричном режимах
68. Вращающееся магнитное поле трехфазной системы
69. Вращающееся магнитное поле двухфазной системы
70. Пульсирующее магнитное поле
71. Измерение мощности и энергии в трехфазной цепи

## **Раздел 5. Электрические цепи с несинусоидальными периодическими напряжениями и токами**

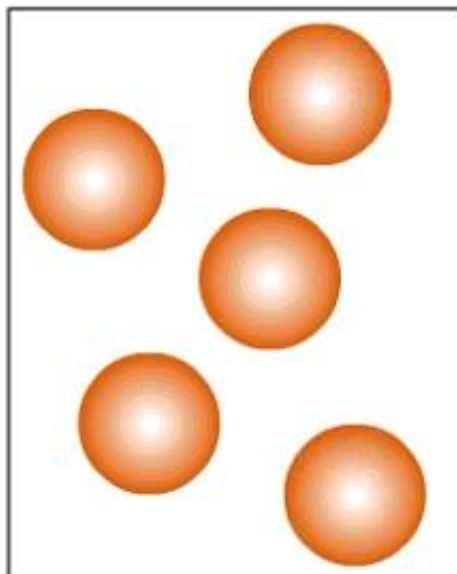
- 72. Теорема Фурье (определение гармоник)
- 73. Свойства периодических кривых
- 74. Таблица несинусоидальных кривых правильной формы
- 75. Параметры несинусоидального тока в линейных электрических цепях. Действующие значения несинусоидальных величин
- 76. Электрические фильтры (Г-образный фильтр)

## **Раздел 6. Нелинейные электрические цепи переменного тока**

- 77. Выпрямители
- 78. Катушка с ферромагнитным сердечником
- 79. Феррорезонанс
- 80. Переходные процессы в электрических цепях. Законы коммутации. Переходные процессы в цепях с индуктивностью
- 81. Переходные процессы в цепях с емкостью

## Поляризация

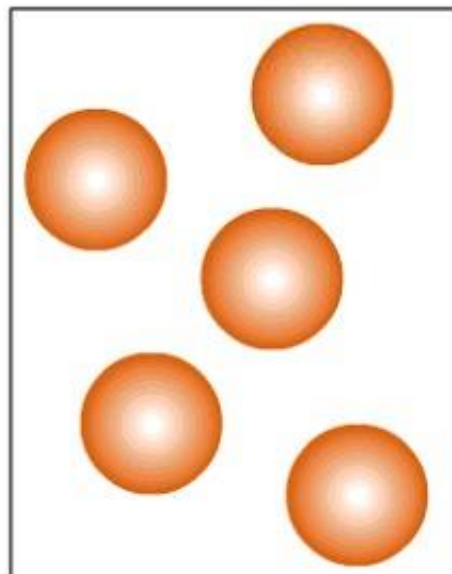
определение



Поместить диэлектрик  
в электрическое поле

## Пробой

определение



Поместить диэлектрик  
в электрическое поле  
и постепенно повышать  
в нем напряженность

## Электрическая прочность диэлектрика

определение

формула

$E_{пр}$  — электрическая прочность  
диэлектрика, В/м;

$U_{пр}$  — пробивное напряжение, В;

$d$  — толщина диэлектрика, м

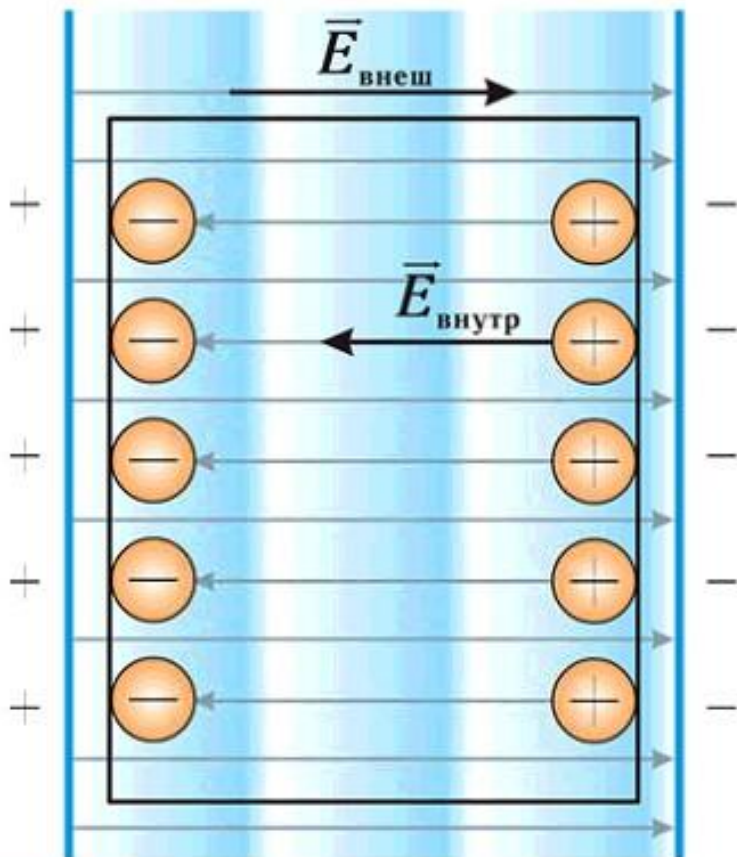


## Проводники в электрическом поле

**Электропроводность** — способность вещества пропускать электрический ток.

**Проводники** обладают высокой электропроводностью. К проводникам относятся все металлы, некоторые сплавы, уголь, электролиты.

Разделение зарядов в проводнике



Явление разделения электрических зарядов в проводнике под действием внешнего электрического поля называется **электростатической индукцией**.

Проводник в электростатическом поле

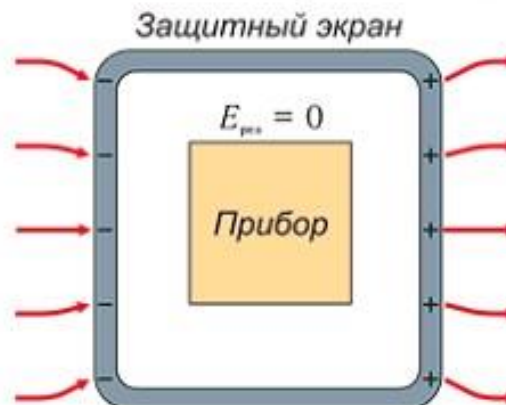
$$E_{\text{внутр}} = E_{\text{внеш}}$$

$E_{\text{внутр}}$  — напряженность поля разделенных зарядов, В/м;  
 $E_{\text{внеш}}$  — напряженность внешнего поля в проводнике, В/м;  
 $E_{\text{рез}}$  — напряженность результирующего поля, В/м

$$E_{\text{рез}} = 0$$

В проводниках отсутствует электростатическое поле — поле неподвижных зарядов.

Применение явления электростатической индукции



## Электрический ток

**Электрический ток** — это явление упорядоченного (направленного) перемещения заряженных частиц в проводнике под действием электрического поля.

Сила тока:

$$I = \frac{Q}{t} \text{ А}$$

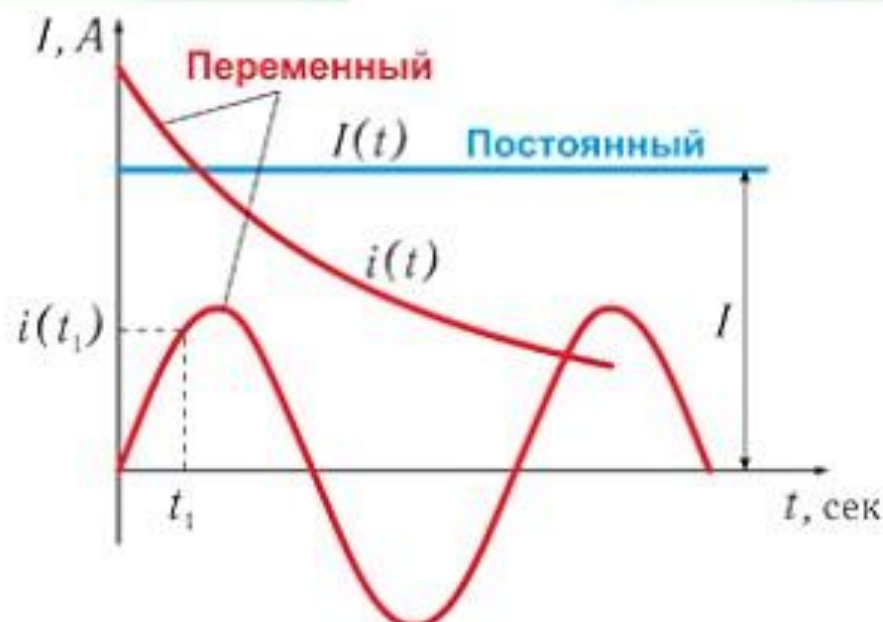
Сила тока в проводнике равна заряду  $Q$  (Кл), проходящему за единицу времени  $t$  (с) через сечение проводника.

$$1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/1 с}$$

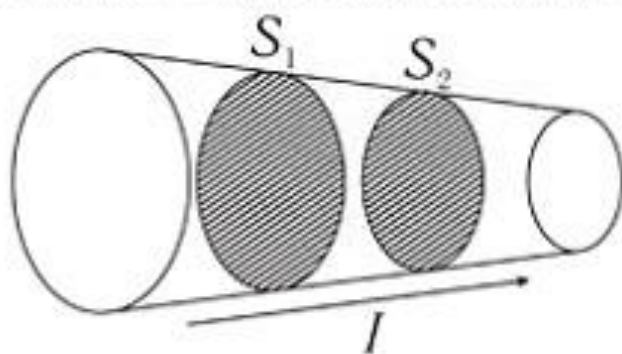
## Разновидности электрического тока

**Переменный** — с течением времени меняется.

**Постоянный** — длительно неизменяющийся по величине и направлению.



**Плотность тока** — отношение величины тока в проводнике  $I$  к площади его поперечного сечения  $S$  и обозначается буквой  $J$ .



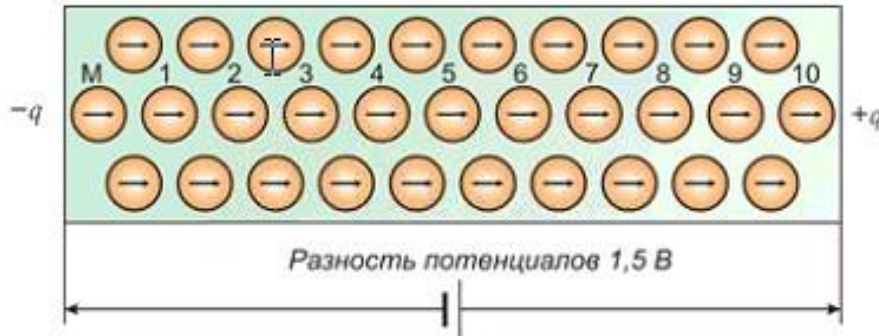
$$J = \frac{I}{S} \text{ А/м}^2$$

В проводах разного сечения при одном и том же токе плотность тока обратно пропорциональна площади поперечного сечения проводника.



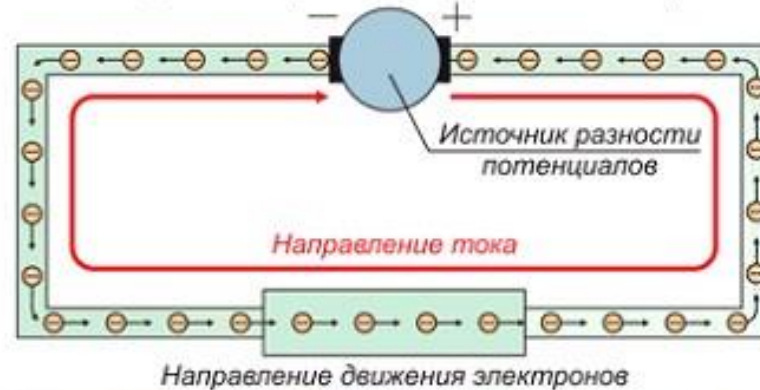
## Электрический ток (направление и скорость эл. тока)

Разность потенциалов на двух концах металлического проводника вызывает в нем движение свободных электронов, создавая электрический ток.



Сила тока в любой точке провода одинакова.

Условное направление электрического тока не совпадает с направлением движения электронов.



Ток протекает от «+» источника к его «-» через внешнюю цепь.

**Скорость электрического тока — это скорость передачи энергии от одного электрона другому**

### Пример с шарами в трубе.

Если сдвинуть первый шар на 3 см за 1 секунду, то последний шар за ту же секунду тоже сдвинется на 3 см.



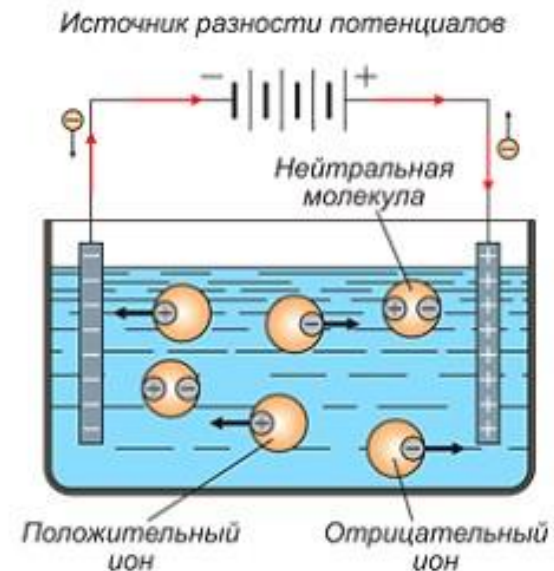
Скорость движения каждого шара  $v_1 = v_2 = v_3 \dots = v_{10} = 0,03 \text{ м/с}$

Скорость передачи движения от одного шара к другому  $v_{\text{передачи движения}} = 10 \text{ м/с}$

Скорость движения электрона  $v_e \approx 0,5 \text{ мм/с}$

Скорость электрического тока  $v \approx 300\,000 \text{ км/с}$

Направленное движение ионов в электролите под действием разности потенциалов



## Электрическое сопротивление

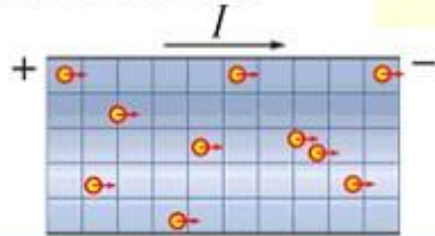
**Электрическое сопротивление** — это противодействие, которое атомы или молекулы проводника оказывают электрическому току.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}, \text{ Ом}$$

$\rho$  — удельное сопротивление материала проводника, Ом · м;  
 $l$  — длина проводника, м;  
 $S$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>

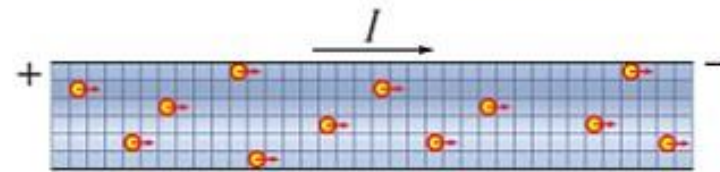
Короткий толстый проводник — сопротивление маленькое

$$\downarrow R = \frac{\rho \cdot l \downarrow}{S \uparrow}$$



Тонкий длинный проводник — сопротивление большое

$$\uparrow R = \frac{\rho \cdot l \uparrow}{S \downarrow}$$



**Проводимость** — величина, обратная сопротивлению.

$$G = \frac{1}{R}, \text{ См (Сименс)}$$

## Зависимость сопротивления от температуры

Сопротивление материала в зависимости от температуры

$$R_2 = R_1 [1 \pm \alpha_p (t_2 - 20^\circ)]$$

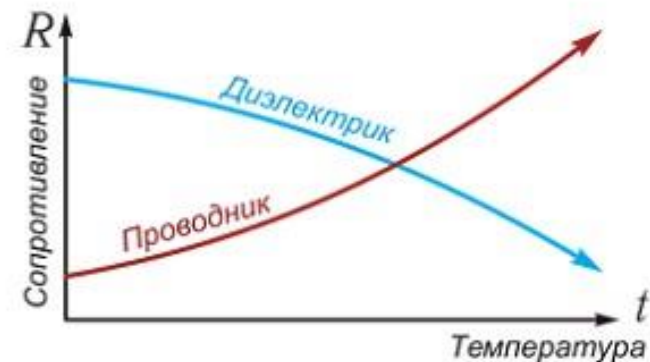
«+» — для проводника;

«-» — для диэлектрика

$R_1$  — сопротивление материала при начальной температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , Ом;

$R_2$  — сопротивление материала при конечной температуре  $t_2$ , Ом;

$\alpha_p$  — температурный коэффициент удельного сопротивления;  $^\circ\text{C}^{-1}$

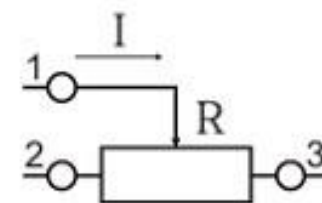


## Приборы сопротивления

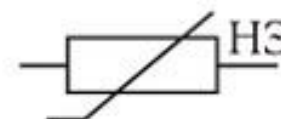
**Резистор** — это прибор, обладающий неизменным сопротивлением.



**Реостат.** Сопротивление реостата регулируется.

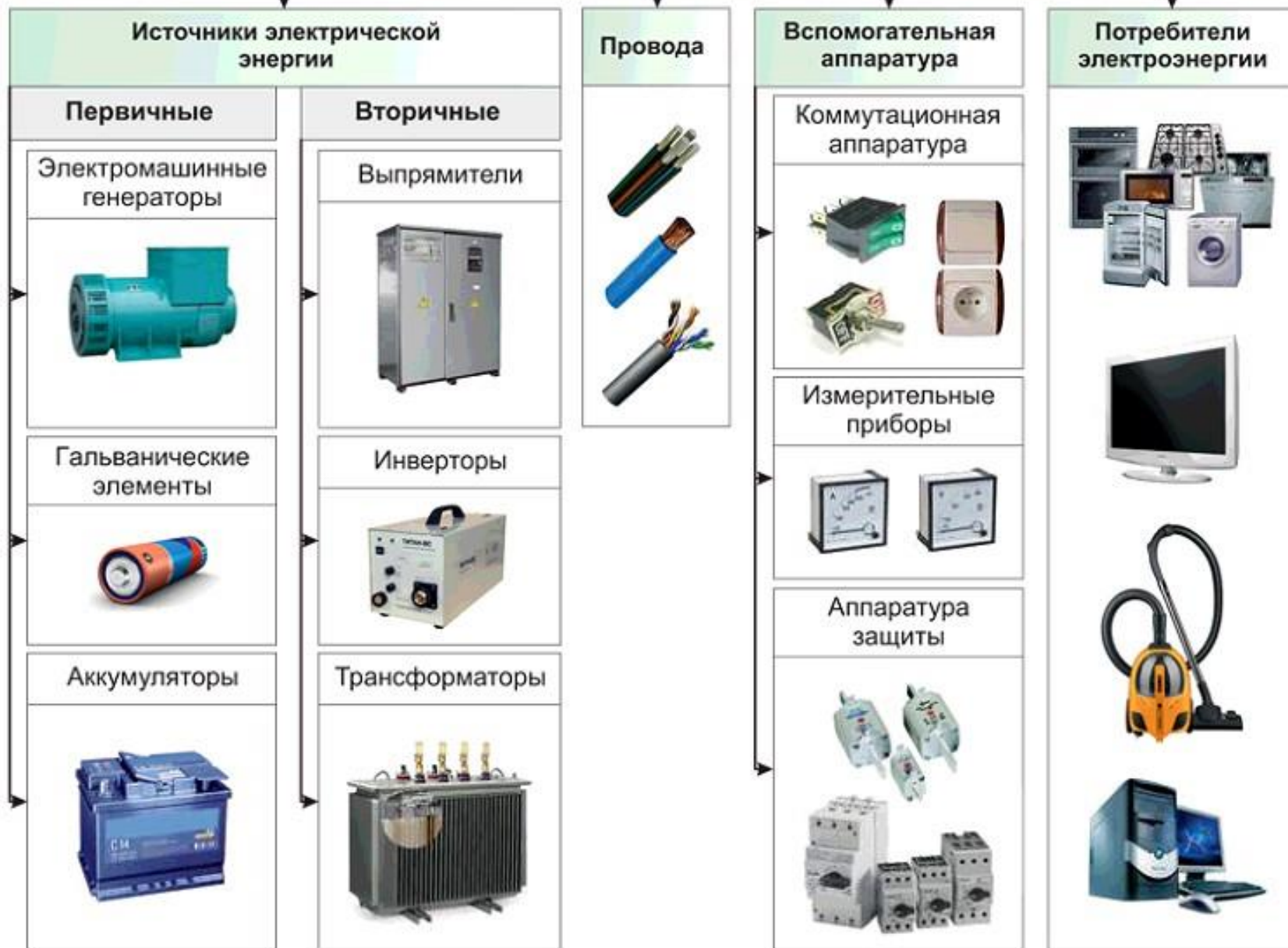


**Нелинейный элемент.** Сопротивление нелинейного элемента зависит от какого-либо фактора, не является постоянным.



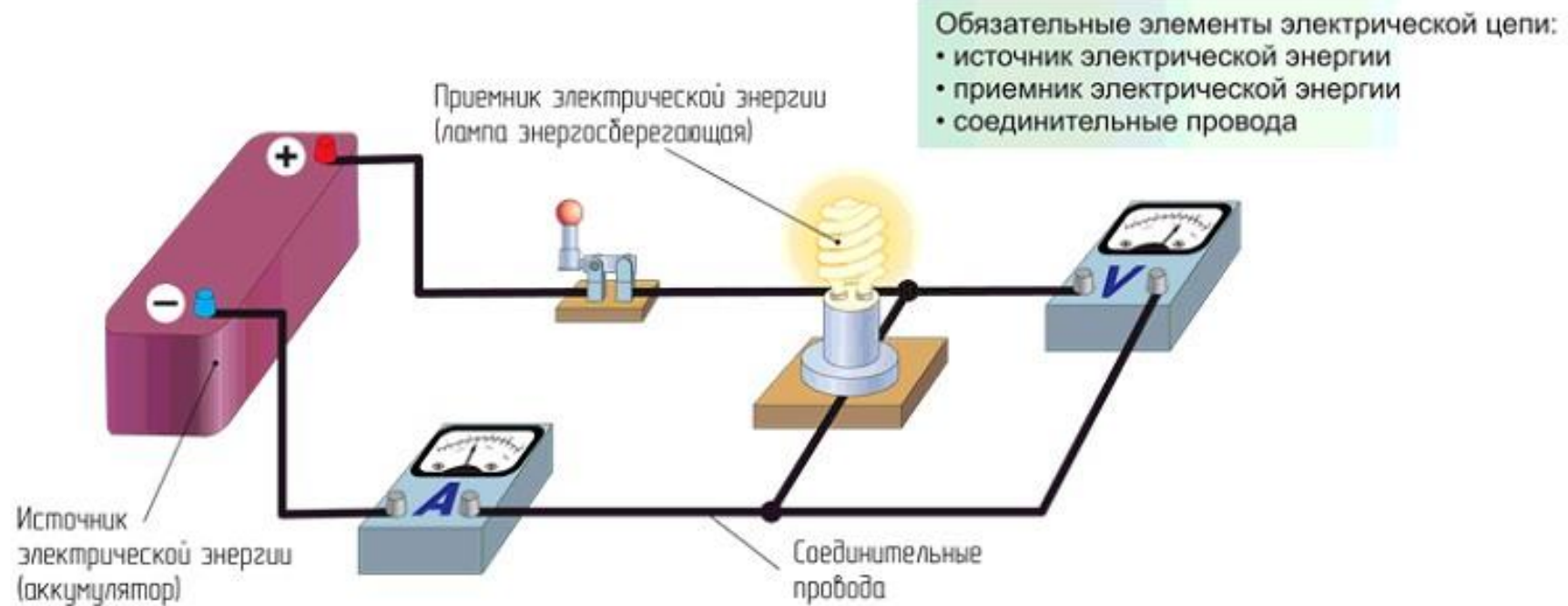


# Электрическая цепь и ее элементы

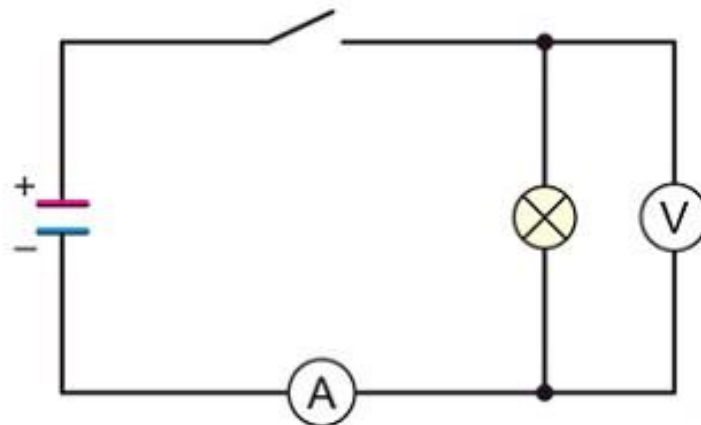


## Схема электрической цепи

Электрическая цепь — это устройство для протекания электрического тока.



Принципиальная электрическая схема





## Условные обозначения элементов электрических цепей

	Аккумулятор, гальванический элемент		Рубильник, контакт
	Генератор постоянного тока		Контакт нормально разомкнутый
	Генератор трехфазного переменного тока		Автоматический выключатель
	Генератор переменного тока		Трехполюсный автоматический выключатель
	Источник ЭДС		Контакт нормально замкнутый
	Двигатель постоянного тока		Кнопка пуск
	Лампа накаливания		Кнопка стоп
	Сигнальная лампа		Контакт реле времени
	Резистор, приемник электроэнергии		Трансформатор
	Переменный резистор		Трансформатор
	Реостат		Диод
	Катушка индуктивности		Амперметр
	Конденсатор		Вольтметр
	Конденсатор переменной емкости		Омметр
	Предохранитель		Счетчик
	Катушка реле, пускателя или контактора		

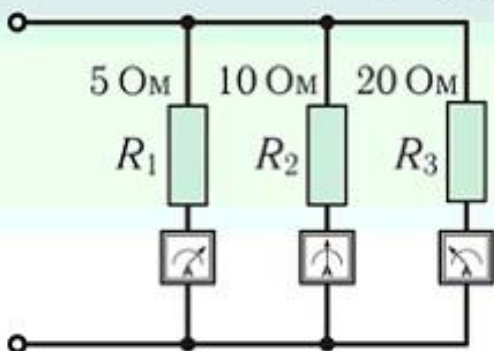
## Закон Ома для участка электрической цепи

Сила тока на участке электрической цепи прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению этого участка.

Чем больше сопротивление, тем меньше ток.

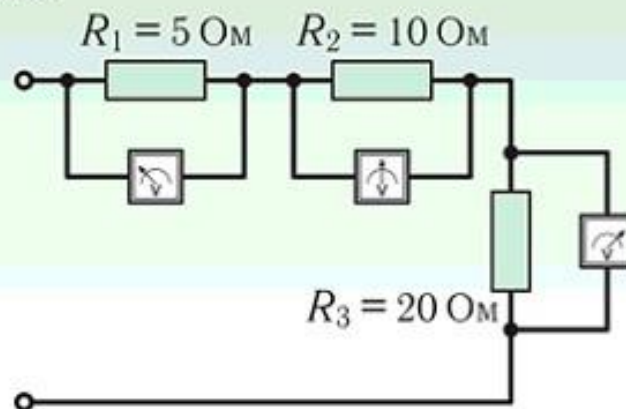
$$I_i \downarrow = \frac{U}{R_i \uparrow}$$

$i = 1, 2, 3 \dots$



Чем больше сопротивление участка цепи, тем выше напряжение на этом участке.

$$\uparrow U_i = I \cdot R_i \uparrow$$



## Закон Ома для замкнутой цепи

Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника и обратно пропорциональна сумме сопротивлений внешнего и внутреннего участков электрической цепи.

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

Формулы, следующие из закона Ома для замкнутой цепи

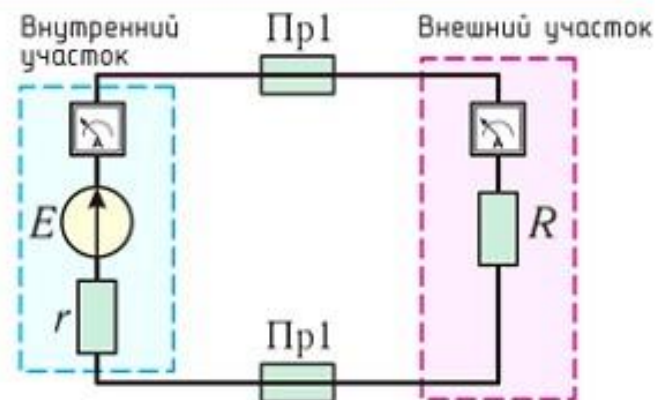
ЭДС источника:  $E = I \cdot (R + r), \text{ В}$

$$E = \underbrace{I \cdot R}_U + \underbrace{I \cdot r}_{U_0}, \text{ В}$$

Напряжение на внешнем участке цепи

Падение напряжения внутри источника

$$E = U + U_0$$



## ЭДС источника электрической энергии

Отношение работы сторонних сил по переносу заряда внутри источника к величине заряда называется **ЭДС источника**.

$$E = A_{\text{ист}}/q, \text{ В} \quad 1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/1 Кл}$$



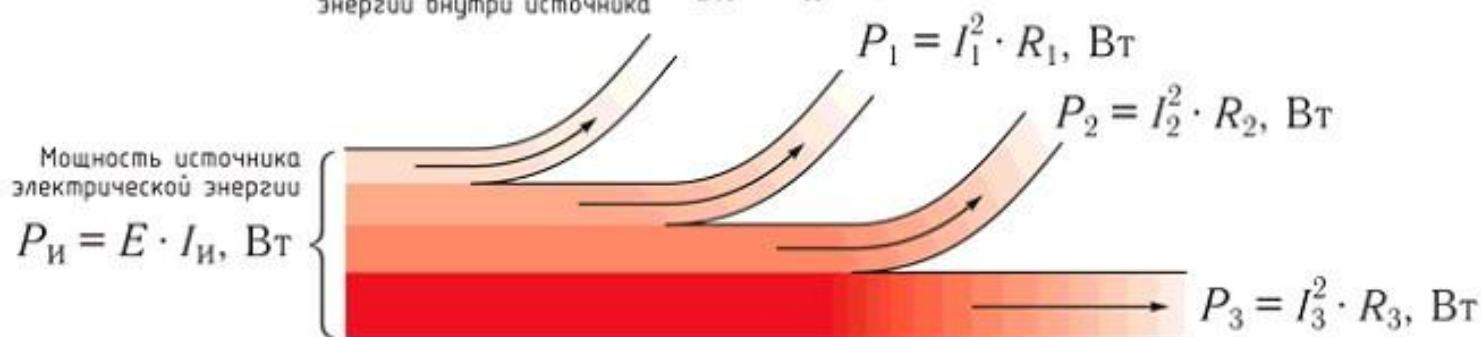
## Баланс мощностей

Алгебраическая сумма мощностей источников электрической энергии равна сумме мощностей всех приемников и потерь энергии внутри источников.

$$\Sigma P_{\text{И}} = \Sigma P_i + \Sigma P_{\text{ВН}}$$

## Энергетическая диаграмма электрической цепи

Мощность потерь внутри источника определяет непроизводительный расход энергии внутри источника  $P_{\text{ВН}} = I_{\text{И}}^2 \cdot r, \text{ Вт}$



$P_1, P_2, P_3 \dots P_i$  — мощность приемников электроэнергии. Характеризуют скорость преобразования электроэнергии в приемнике в другой вид полезные мощности;

$R_1, R_2$  и  $R_3$  — любые приемники электроэнергии, соединенные любым способом в любой последовательности

Баланс мощностей для энергетической диаграммы

$$P_{\text{И}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_{\text{ВН}}$$

## КПД источника электрической энергии

$$\eta = \Sigma P_i / P_{\text{И}} \cdot 100 \%$$

Отношение полезной мощности  $\Sigma P_i$  к мощности источника  $P_{\text{И}}$ .



## Режимы работы источника электрической энергии

1. Режим холостого хода. Зажимы источника разомкнуты.

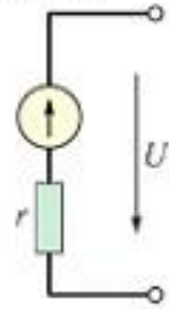
$$R_{xx} = \infty$$

$$I_{xx} = 0$$

$$U = E$$

$$\eta = \frac{U}{E} \cdot 100 \% = 100 \%$$

Приемник  
отключен



2. Режим короткого замыкания. Зажимы источника замкнуты накоротко.

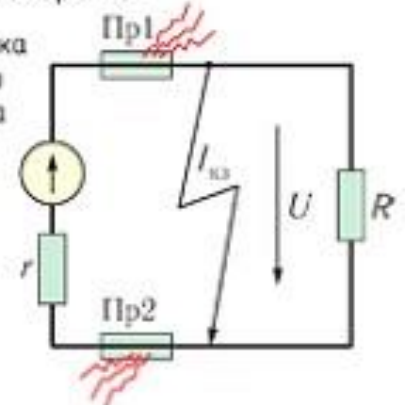
$$R_{кз} = r$$

$$I_{кз} = \frac{E}{r} = I_{max}$$

$$U = 0$$

$$\eta = \frac{U}{E} \cdot 100 \% = 0$$

Мощность источника  
теряется внутри  
самого источника



3. Режим согласования. От источника приемнику передается максимальная мощность.

$$I_{согл} = \frac{I_{кз}}{2}; \quad R_{согл} = R + r = 2 \cdot R$$

КПД в режиме согласования:

$$\eta_{согл} = \frac{U_{согл}}{E} = 50 \%, \quad \text{т. к. } U_{согл} = \frac{E}{2}$$

Применяется в установках  
автоматики, телемеханики,  
электросвязи малой мощности

4. Номинальный режим. Ток, напряжение и мощность цепи — номинальные, рассчитанные заводом изготовителем.

$$(I_{ном}, U_{ном}, P_{ном})$$

Мощные источники ЭДС (генераторы) работают на внешнее сопротивление

$$R_{ном} = (10+20)r, \quad \text{при этом } \eta_{ном} \geq 95 \%$$

5. Рабочий режим. Любой режим от короткого замыкания до холостого хода.

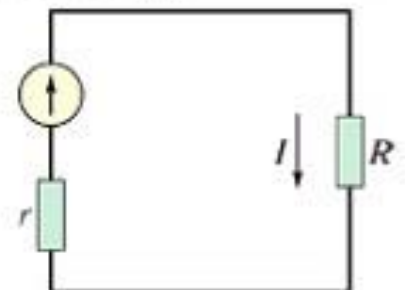
$$I_p \text{ — от } 0 \text{ до } I_{кз}$$

$$U_p \text{ — от } E \text{ до } 0$$

$$R_p \text{ — от } r \text{ до } \infty$$

$$\eta_p \text{ — от } 0 \text{ до } 100 \%$$

Холостой ход и короткое замыкание —  
крайние режимы работы источника ЭДС



# Источники электрической энергии

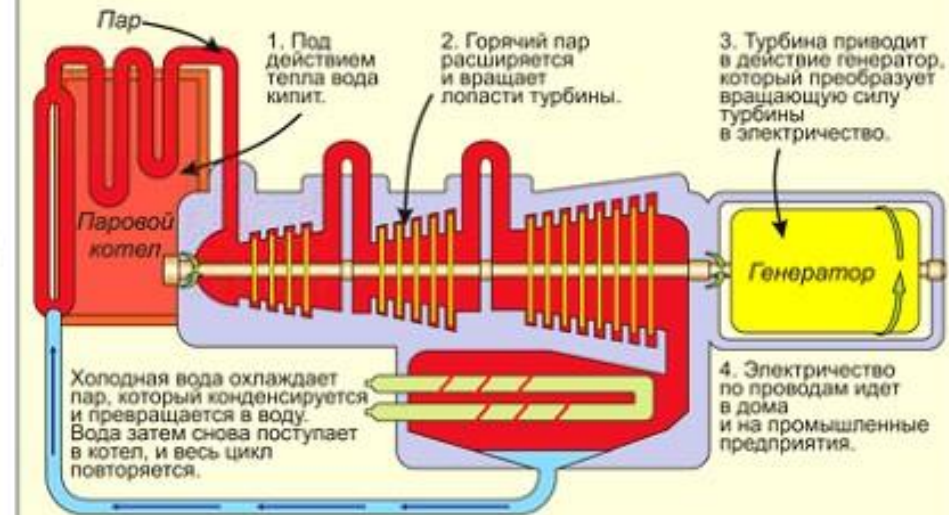
Промышленный  
дизель-генератор



Газовый  
генератор



Технологический процесс производства электроэнергии  
Схема работы ТЭС



Аккумуляторные батареи





## Альтернативные источники электрической энергии

**Альтернативный источник энергии** — способ, устройство или сооружение, позволяющее получать электрическую энергию (или другой требуемый вид энергии) и заменяющий собой традиционные источники энергии, функционирующие на нефти, добываемом природном газе и угле.



Тип источников	преобразуют в электрическую энергию
Ветряные	движение воздушных масс
Геотермальные	тепло планеты
Солнечные	электромагнитное излучение солнца
Гидроэнергетические	падение, перемещение воды
Биотопливные	теплоту сгорания возобновляемого топлива (например, спирта)

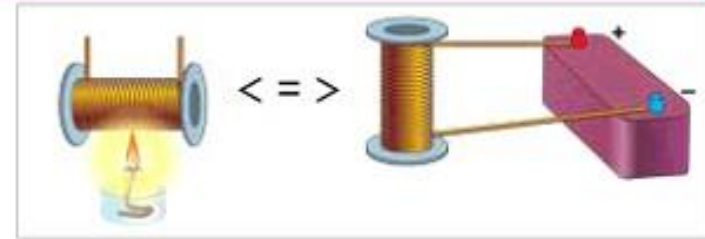


## Тепловое действие электрического тока

### Закон Джоуля — Ленца

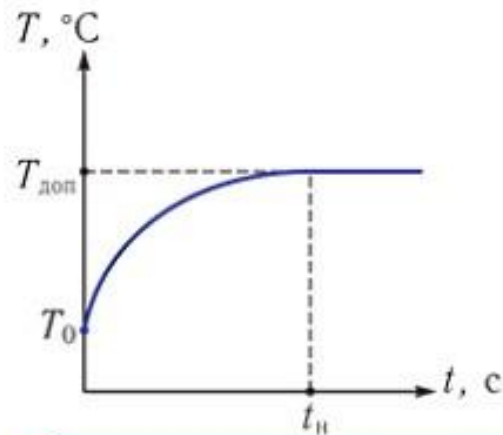
При протекании тока по проводнику происходит превращение электрической энергии в тепловую, причем количество выделенного тепла будет равно работе электрических сил

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$



Количество теплоты ( $Q$ ), выделяемое током в проводнике, прямо пропорционально квадрату силы тока [ $I$ , А], сопротивлению проводника [ $R$ , Ом] и времени протекания тока [ $t$ , с].

### Расчет сечения проводов по допустимому нагреву



#### Процесс нагревания провода

$T_{\text{доп}}$  — допустимая температура нагрева, ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Это максимальная температура, при которой данный провод может работать длительное время.

$t_{\text{н}}$  — время нагревания, с.

Это время, за которое провод нагревается от начальной температуры  $T_0$  до  $T_{\text{доп}}$ .

Оно длится от нескольких секунд у нитей ламп накаливания до нескольких часов у мощных электрических машин.

Максимальный ток, при длительном прохождении которого проводник не перегревается выше  $T_{\text{доп}}$ , называется **предельно допустимым** или **номинальным током** провода.

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{н}}$$

Значения номинальных токов для проводов и кабелей различных марок и условий прокладки указаны в «Правилах устройства электроустановок».



## Значения номинальных токов для проводов с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Медные провода				Алюминиевые провода		
	Допустимая нагрузка при способе прокладки, А						
	Провода проложены открыто	Провода проложены в трубе			Провода проложены открыто	Провода проложены в трубе	
		два одно-жильных	три одно-жильных	один дву-жильный		два одно-жильных	три одно-жильных
1	15	14	13	13	—	—	—
1,5	20	17	15	16	—	—	—
2,5	27	24	22	22	21	18	17
4	36	34	31	28	28	25	25
6	46	41	37	35	35	32	28
10	70	60	55	50	50	45	42
16	90	75	70	70	70	55	55
25	125	100	90	90	95	75	70
35	150	150	110	110	115	90	85
50	190	190	140	140	145	125	115
70	240	240	185	175	185	155	145

### Пример.

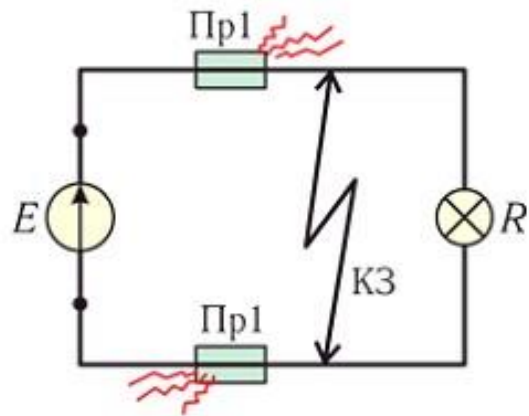
Для питания 40 ламп требуется проложить в трубе два (прямой и обратный) медных одножильных провода. Определить их сечение, если напряжение сети  $U = 120$  В, а мощность каждой лампы 150 Вт.  
Решение.

Полная мощность нагрузки  $P = 150 \cdot 40 = 6000$  Вт. Рабочий ток  $I_p = P/U = 6000/120 = 50$  А.

По таблице выбираем медный провод сечением  $S = 10$  мм<sup>2</sup> с номинальным током  $I_{ном} = 60$  А.

$$I_p \leq I_{ном}$$

## Защита проводов от больших токов



### Причины короткого замыкания:

- повреждение изоляции проводов;
- неправильные действия обслуживающего персонала

$$I_{\text{КЗ}} \gg I_{\text{Н}}$$

При КЗ в проводах выделяется огромное количество теплоты  $Q$ , что приводит к возникновению пожара.

### Для защиты электрических цепей от КЗ служат:

Плавкие предохранители



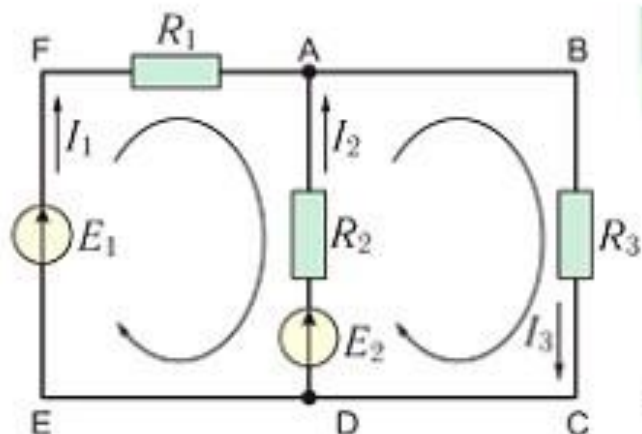
Автоматические выключатели



Тепловые реле



## Элементы электрических цепей



Изображение электрической цепи при помощи условных обозначений называется **электрической схемой**.

**Ветвь** — это участок цепи, по которому протекает один и тот же ток ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  — ветви).

**Узел** — место соединения трех и более ветвей (A и D — это узлы)

**Контур** — это любой замкнутый путь тока образованный несколькими ветвями (ADEFA, ABCDA, FBCEF — контуры).

В электрической цепи различают активные и пассивные элементы (участки):

- активные элементы — источники ЭДС (аккумуляторы, генераторы);
- пассивные элементы — приемники электрической энергии

## Первый закон Кирхгофа (Закон токов)

Алгебраическая сумма токов в любом узле любой электрической цепи равна нулю.

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

**Пример** (за основу взята представленная электрическая схема).

Уравнение по первому закону Кирхгофа составляется для **узла** электрической цепи.

Для узла A:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

## Второй закон Кирхгофа (Закон напряжений)

Алгебраическая сумма ЭДС в любом замкнутом контуре цепи равна алгебраической сумме падений напряжений, действующих вдоль этого же контура.

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

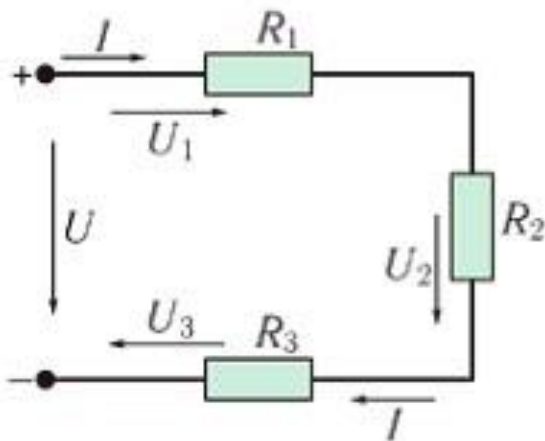
**Пример** (за основу взята представленная электрическая схема).

Уравнение по второму закону Кирхгофа составляется для **контура** цепи.

Для контура ADEFA:  $E_1 - E_2 = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2$



## Последовательное соединение приемников электрической энергии



Последовательным называют соединение приёмников друг за другом, без разветвлений.

При последовательном соединении по всем участкам цепи протекает один и тот же ток —  $I = \text{const}$

Напряжение на каждом участке зависит от его сопротивления (по закону Ома):

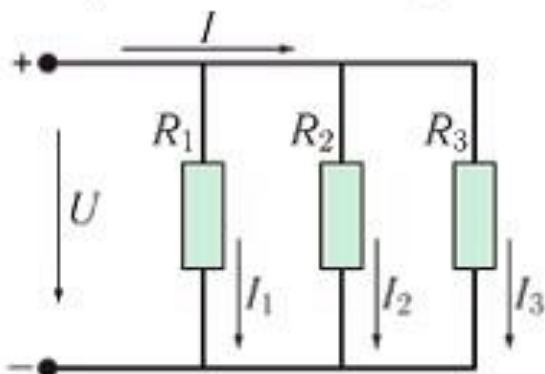
$$U_1 = I \cdot R_1, \quad U_2 = I \cdot R_2, \quad U_3 = I \cdot R_3$$

По второму закону Кирхгофа:  $U = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 = I \cdot R_3$

Эквивалентное сопротивление цепи:  $R_3 = R_1 + R_2 + R_3, \text{ Ом}$

Мощность цепи:  $P = P_1 + P_2 + P_3$

## Параллельное соединение приемников электрической энергии



Параллельным называется соединение, при котором приёмники находятся между двумя узлами под одним и тем же напряжением.

$$U = \text{const}$$

Ток в каждой ветви зависит от ее сопротивления:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

По первому закону Кирхгофа:  $I = I_1 + I_2 + I_3; \quad I = \frac{U}{R_3}$

Эквивалентное сопротивление цепи:  $R_3 = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_2 R_3 + R_1 R_3 + R_1 R_2}$

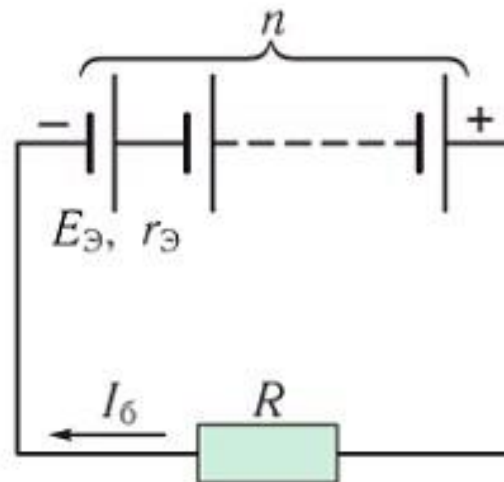
В общем случае:  $\frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$

или эквивалентная проводимость:  $G_3 = G_1 + G_2 + G_3$

## Способы соединения источников ЭДС в батарее

### Последовательное соединение источников ЭДС

Применяется, если ЭДС одного источника меньше номинального напряжения приемника, а ток одного источника равен номинальному току приемника.



ЭДС батареи источников:  $E_6 = n \cdot E_{\text{Э}}$

Внутреннее сопротивление батареи:  $r_6 = n \cdot r_{\text{Э}}$

Емкость батареи:  $Q_6 = Q_{\text{Э}}$

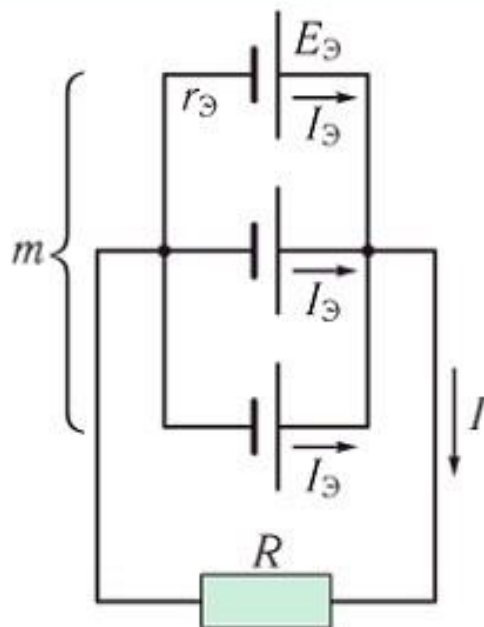
Ток батареи:  $I_6 = I_{\text{Э}}$

При последовательном соединении все элементы заряжаются и разряжаются одинаковым током.

## Способы соединения источников ЭДС в батарее

### Параллельное соединение источников ЭДС

Применяется, если ЭДС одного источника равна номинальному напряжению приемника, а ток одного источника меньше номинального тока приемника.



ЭДС батареи источников:  $E_6 = E_{\text{Э}}$

Внутреннее сопротивление батареи:  $r_6 = \frac{r_{\text{Э}}}{m}$

Емкость батареи:  $Q_6 = m \cdot Q_{\text{Э}}$

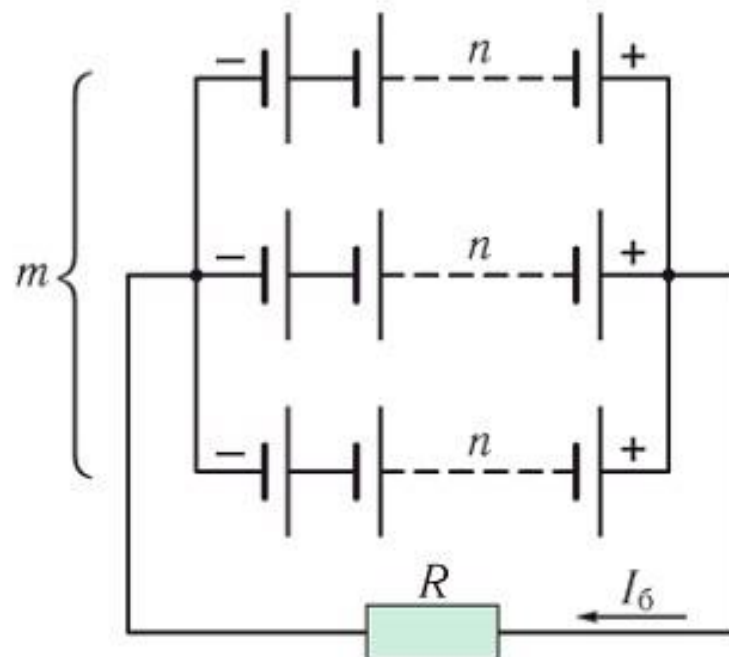
Ток батареи:  $I_6 = m \cdot I_{\text{Э}}$

При параллельном соединении увеличивается разрядный ток и емкость батареи.

## Способы соединения источников ЭДС в батарее

### Смешанное соединение элементов

Применяется для увеличения напряжения и тока батареи источников ЭДС.



ЭДС батареи источников:  $E_6 = n \cdot E_Э$

Внутреннее сопротивление батареи:  $r_6 = \frac{n \cdot r_Э}{m}$

Емкость батареи:  $Q_6 = mQ_Э$

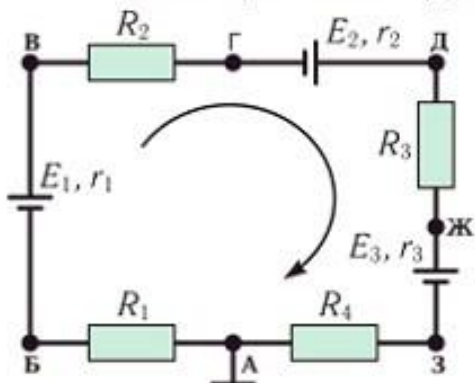
Ток батареи:  $I_6 = mI_Э$

$n$  — число элементов одной ветви;

$m$  — число ветвей батареи



## Потенциальная диаграмма неразветвленной электрической цепи (1)



**Потенциальная диаграмма** — это график зависимости потенциалов точек цепи от величины сопротивлений участков между этими точками.

### Алгоритм расчета и построения потенциальной диаграммы

1. Определить величину и направление тока в цепи:

$$I = \frac{\sum E_i}{\sum (R_i + r_i)}$$

Для определения знаков ЭДС задается произвольно направление обхода контура. ЭДС источника, направление которой совпадает с выбранным направлением обхода, положительная, а если направление ЭДС не совпадает, то она отрицательная:

$$I = \frac{E_1 + E_2 - E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + r_1 + r_2 + r_3}$$

Если в результате расчета ток получится положительным, то его направление совпадает с выбранным направлением обхода контура. Если ток отрицательный, то он направлен противоположно.

2. Принять потенциал одной из точек равным 0:

$$\varphi_A = 0$$

3. Определить потенциалы всех точек схемы, обойдя ее контур по направлению тока, по правилу:

Потенциал в каждой точке определяется потенциалом предыдущей точки плюс ЭДС источника, работающего в режиме генератора, минус ЭДС источника, работающего в режиме потребителя, и минус падение напряжения на сопротивлении между точками цепи:

$$\varphi_A = 0;$$

$$\varphi_B = \varphi_A - I \cdot R_1$$

$$\varphi_D = \varphi_\Gamma + E_2 - I r_2$$

$$\varphi_B = \varphi_B + E_1 - I \cdot r_1$$

$$\varphi_{\text{Ж}} = \varphi_D - I \cdot R_3$$

$$\varphi_\Gamma = \varphi_B - I \cdot R_2$$

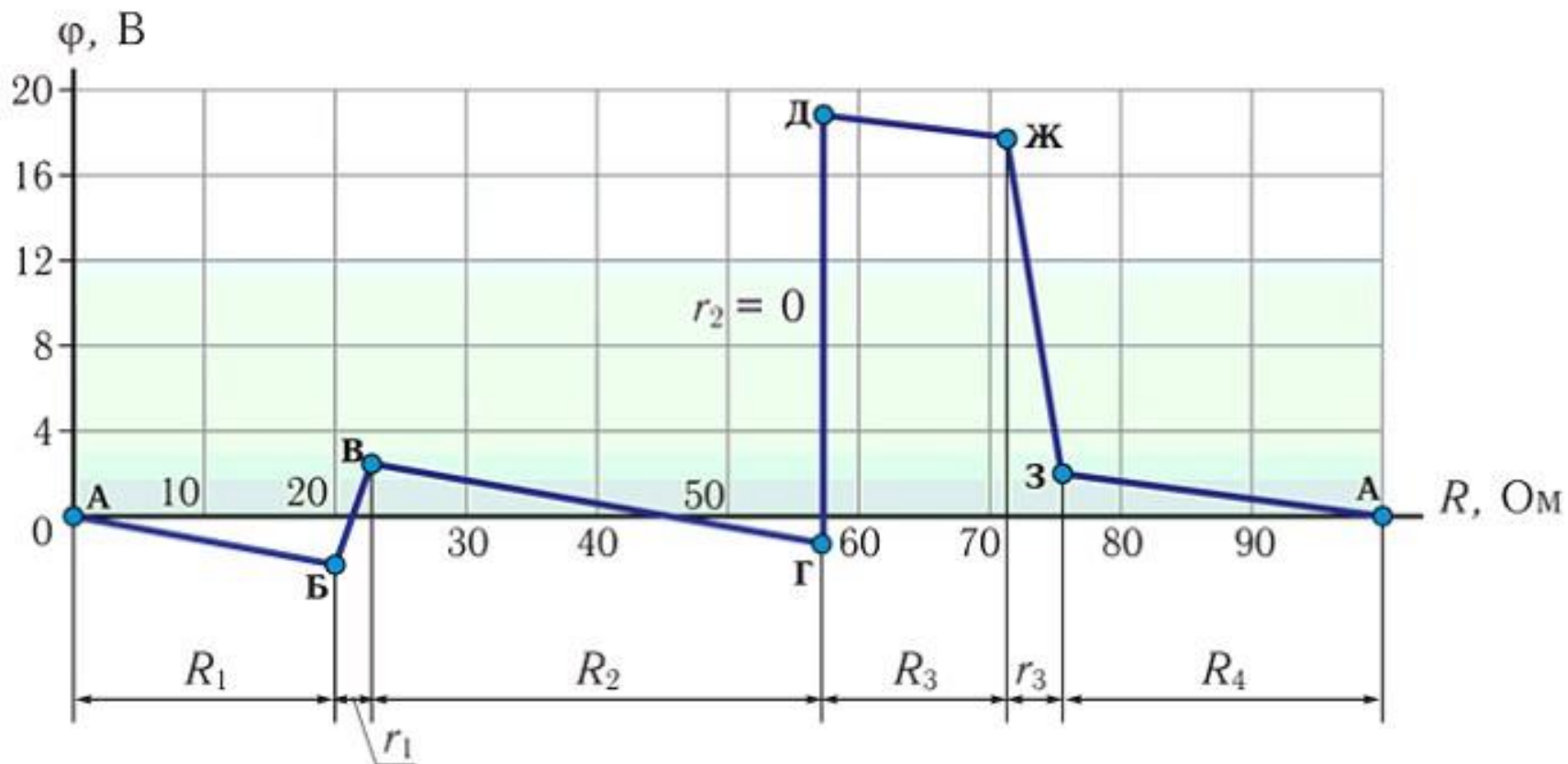
$$\varphi_A = \varphi_{\text{Ж}} + E_3 - I r_3$$

$$\varphi_A = \varphi_3 - I \cdot R_4 = 0$$



## Потенциальная диаграмма неразветвленной электрической цепи (2)

4. Построить потенциальную диаграмму.



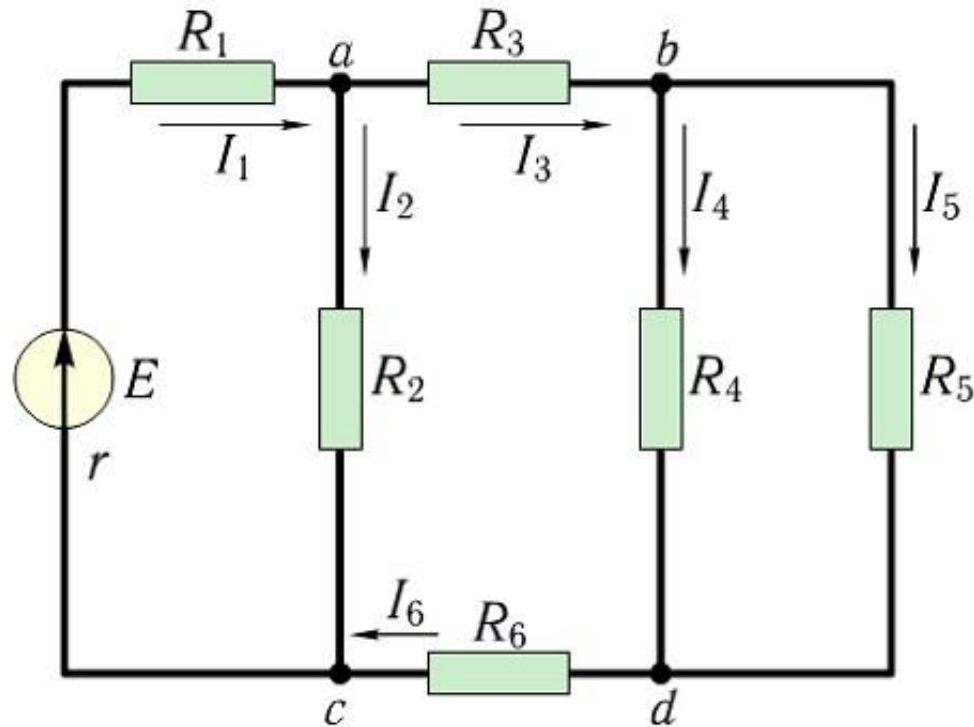
5. Составить баланс мощностей.

$$P_{\text{и1}} + P_{\text{и2}} - P_{\text{и3}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_{\text{вн1}} + P_{\text{вн2}} + P_{\text{вн3}}$$

# Метод эквивалентного сопротивления

## Расчет эквивалентного сопротивления

Исходная схема



Исходная схема

Этап 1

Этап 2

Этап 3

Этап 4 (последний)

Общая схема этапов

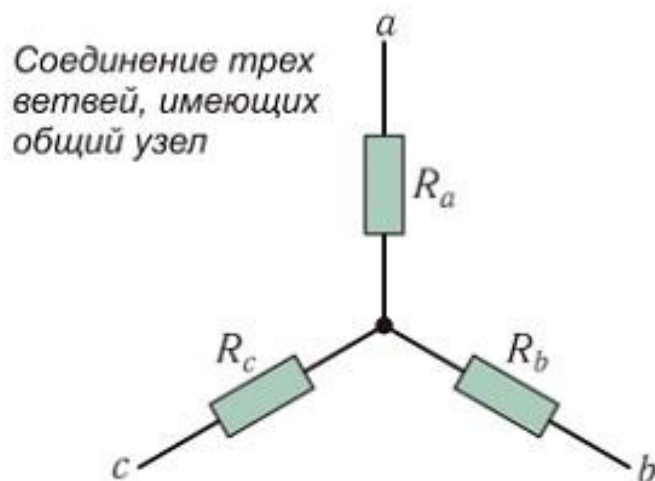
Расчет эквивалентного сопротивления

Расчет потребляемых токов и напряжений

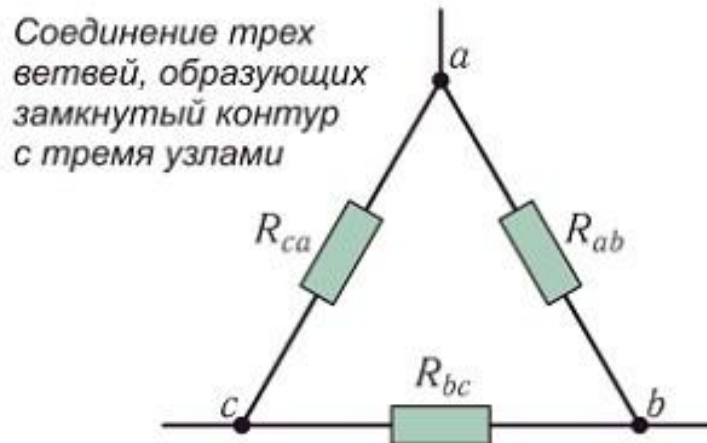
Баланс мощностей

## Взаимные преобразования треугольника и звезды сопротивлений

Звезда сопротивлений



Треугольник сопротивлений



Формулы преобразования звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a \cdot R_b}{R_c}$$

$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b \cdot R_c}{R_a}$$

$$R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c \cdot R_a}{R_b}$$

Формулы преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду:

$$R_a = \frac{R_{ab} \cdot R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

$$R_b = \frac{R_{ab} \cdot R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

$$R_c = \frac{R_{bc} \cdot R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$



## Методы расчета сложных цепей

27

Метод уравнений Кирхгофа

Метод узлового напряжения

Метод контурных токов

Метод эквивалентного генератора

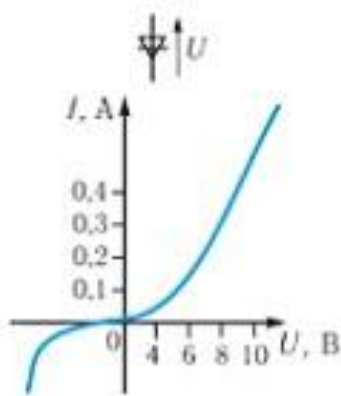
Метод наложения

# Вольт-амперные характеристики нелинейных электрических цепей

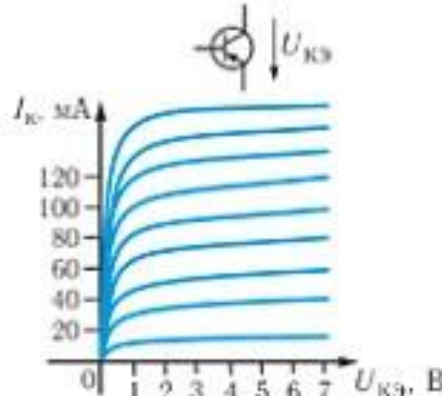
**Вольт-амперная характеристика (ВАХ)** — это зависимость тока в электрической цепи от напряжения  $I(U)$  на ее зажимах.

**Нелинейным** называется элемент, вольт-амперная характеристика которого, нелинейная.

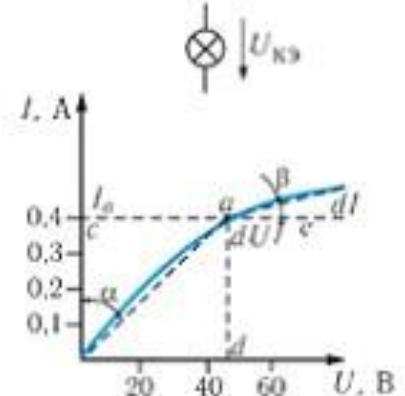
Примеры Вольт-амперных характеристик некоторых нелинейных элементов



Полупроводниковый диод



Биполярный транзистор

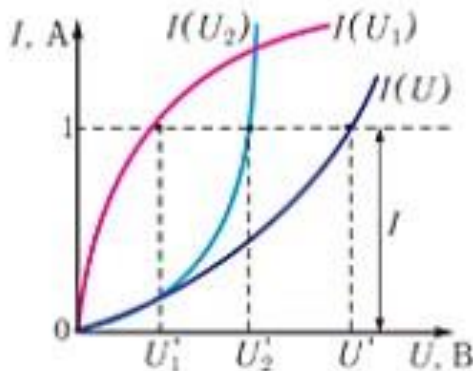
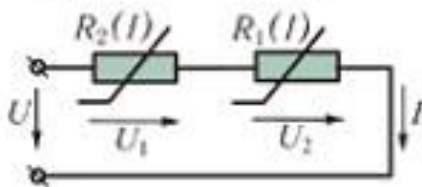


Лампа накаливания

Если в электрической цепи есть хотя бы один нелинейный элемент, то вся цепь **нелинейная**.

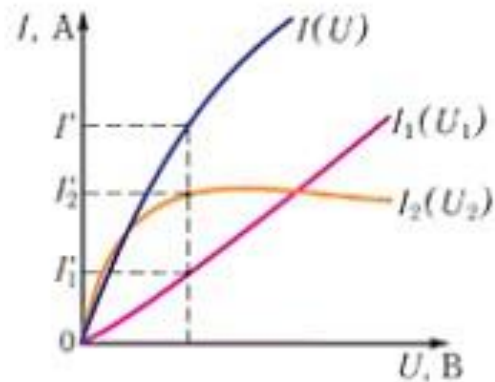
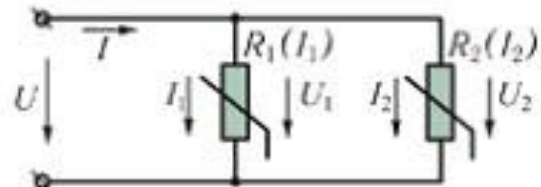
## Графический метод расчета простых нелинейных электрических цепей (1)

Последовательное соединение НЭ



$I(U)$  — ВАХ цепи:  $U = U_1 + U_2$

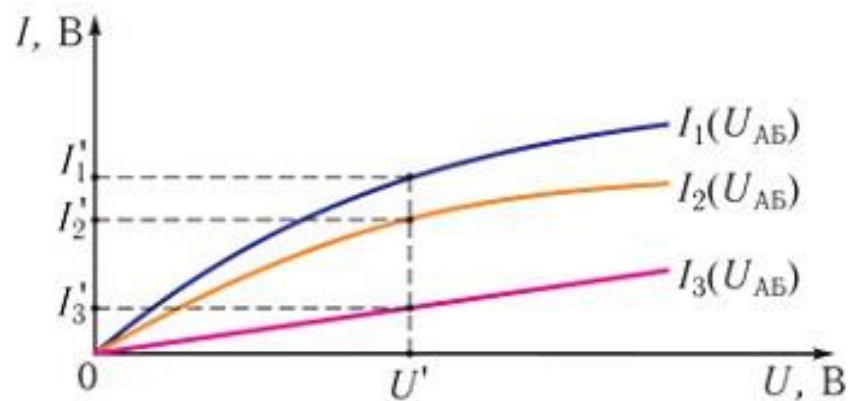
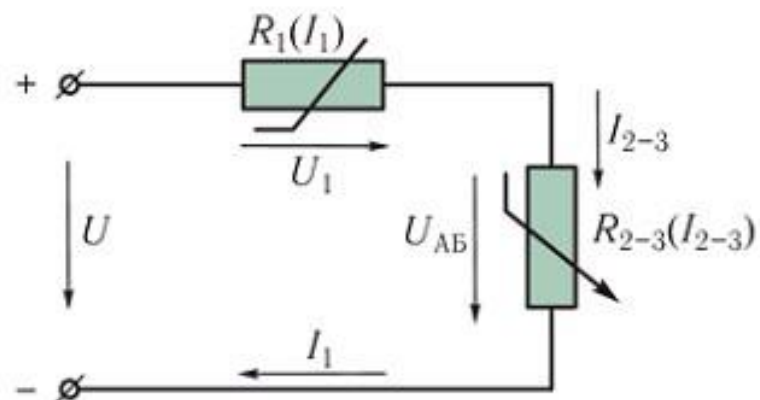
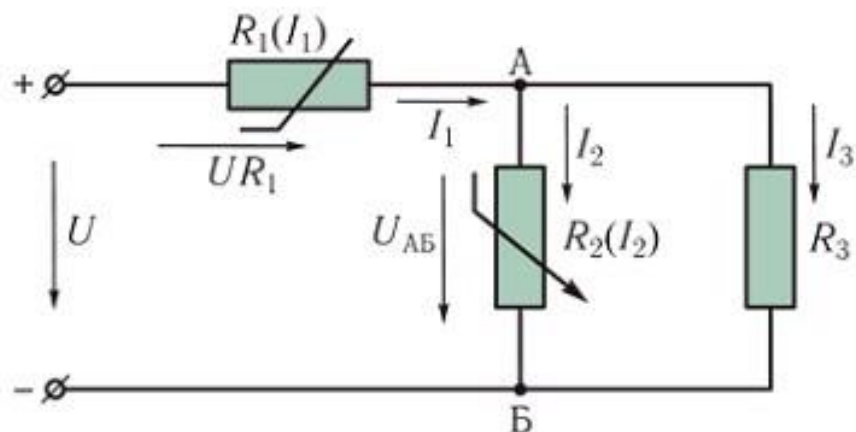
Параллельное соединение НЭ



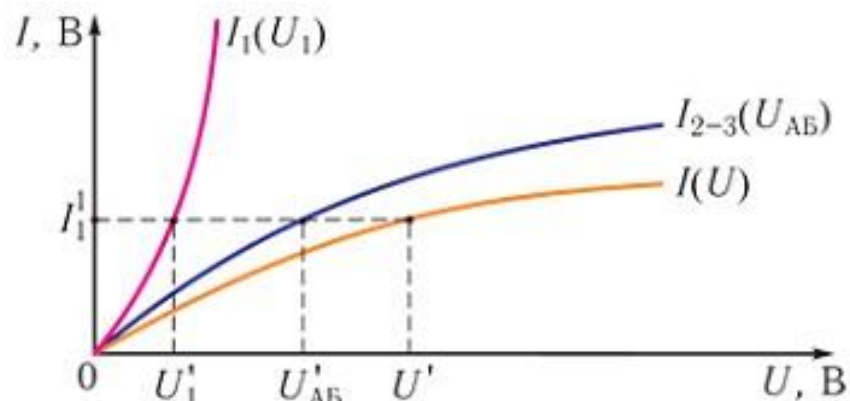
$I(U)$  — ВАХ цепи:  $I = I_1 + I_2$

## Графический метод расчета нелинейных электрических цепей (2)

Смешанное соединение (НЭ)



По первому закону Кирхгофа:  
 $I(U_{AB})$  — ВАХ участка  $I_1 = I_2 + I_3$



По второму закону Кирхгофа:  
 $I(U)$  — ВАХ цепи  $U = U_1 + U_{AB}$



## Закон Кулона

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

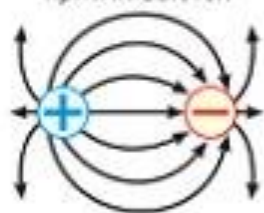
$$F_{\text{Э}} = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi \epsilon \epsilon_0 \cdot r^2}; \text{ Н}$$

$Q_1$  и  $Q_2$  — заряды точечных тел, Кл;

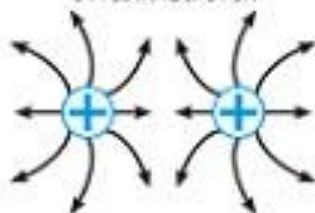
$r$  — расстояние между зарядами, м;

$\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды

Разноименные заряды  
притягиваются



Одноименные заряды  
отталкиваются



Электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{М}}$$

## Характеристики электрического поля

### 1. Напряженность электрического поля $E$ , В/м

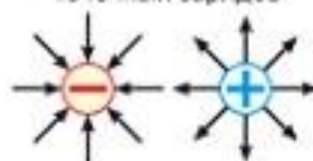
Характеризует силу поля.

Линии напряженности электрического поля разомкнутые направлены от положительного заряда к отрицательному.

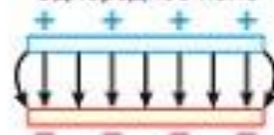
Формула напряженности электрического поля в точке А:

$$E_A = \frac{Q}{4\pi \epsilon \epsilon_0 \cdot r^2}, \text{ В/м}$$

Линии напряженности  
отрицательного и положительного  
точечных зарядов



Однородное поле



### 2. Электрический потенциал $\phi$ , В

Характеризует энергию электрического поля в каждой его точке.

$$\phi_A = W_A / q_A, \text{ В}$$

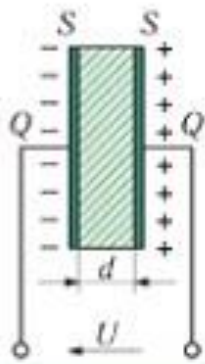
$W_A$  — энергия движения заряженной частицы из точки А за пределы поля, Дж;

$q_A$  — величина заряда, Кл

### 3. Электрическое напряжение $U_{AB}$ , В

Это разность потенциалов между двумя точками электрического поля.

$$U_{AB} = \phi_A - \phi_B, \text{ В}$$

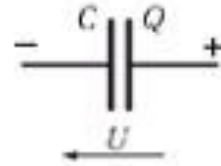


## Конденсаторы

$C$  — емкость конденсатора, Фарад;

$Q$  — заряд конденсатора, Кулон;

$U$  — напряжение на обкладках конденсатора, Вольт



**Электрическая емкость** — характеристика диэлектрика, оценивающая его способность накапливать электрический заряд.

Формула емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0}{d} \cdot S, \text{ Ф}$$

$S$  — площадь одной обкладки,  $\text{м}^2$

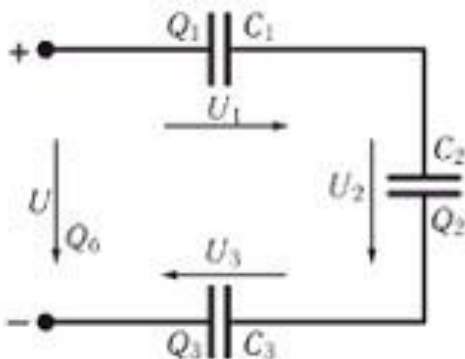
$d$  — толщина диэлектрика, м

$\epsilon$  — относительная электрическая проницаемость диэлектрика;

$\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$

## Конденсаторные батареи

Последовательное  
соединение конденсаторов

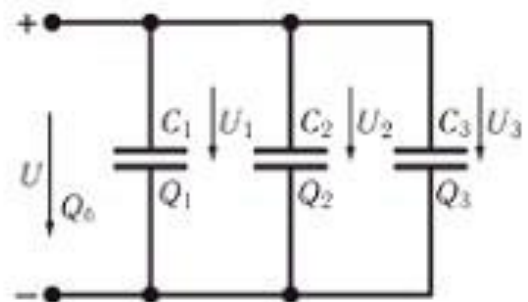


$$C_{\Sigma} = \frac{C_1 \cdot C_2 \cdot C_3}{C_1 \cdot C_2 + C_2 \cdot C_3 + C_3 \cdot C_1}$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$Q_6 = Q_1 = Q_2 = Q_3$$

Параллельное  
соединение конденсаторов



$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3$$

$$U = U_1 = U_2 = U_3$$

$$Q_6 = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

## Магнитная индукция

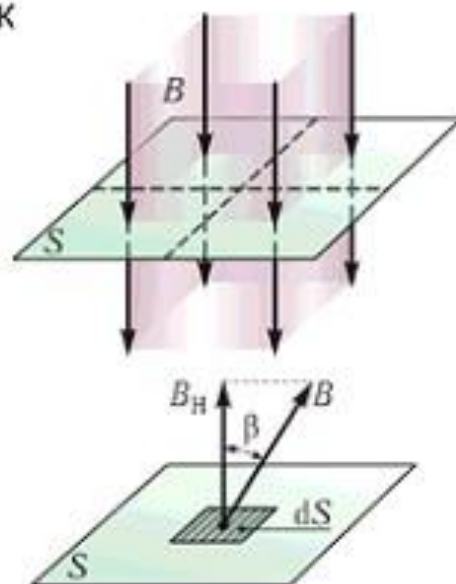
Определяет интенсивность магнитного поля в каждой его точке.

$$B, [\text{Тл}] \text{ Тесла}$$

## Магнитный поток

Произведение магнитной индукции  $B$  однородного поля и площади  $S$ , перпендикулярной вектору магнитной индукции называется **магнитным потоком**.

$$\Phi = B \cdot S, [\text{Вб}] \text{ Вебер}$$



## Магнитодвижущая сила (МДС)

Это произведение силы тока ( $I$ , А) в катушке на число витков в ней ( $W$ ).

$$F = I \cdot W, [\text{А}] \text{ Ампер-виток}$$

## Напряженность магнитного поля

Это магнитодвижущая сила (МДС), приходящаяся на единицу длины магнитной силовой линии.

$$H = \frac{F}{l}, [\text{А/м}]$$

$l$  — длина магнитной силовой линии, м



## Направление линий магнитного поля

Направление магнитного поля определяется по правилу буравчика

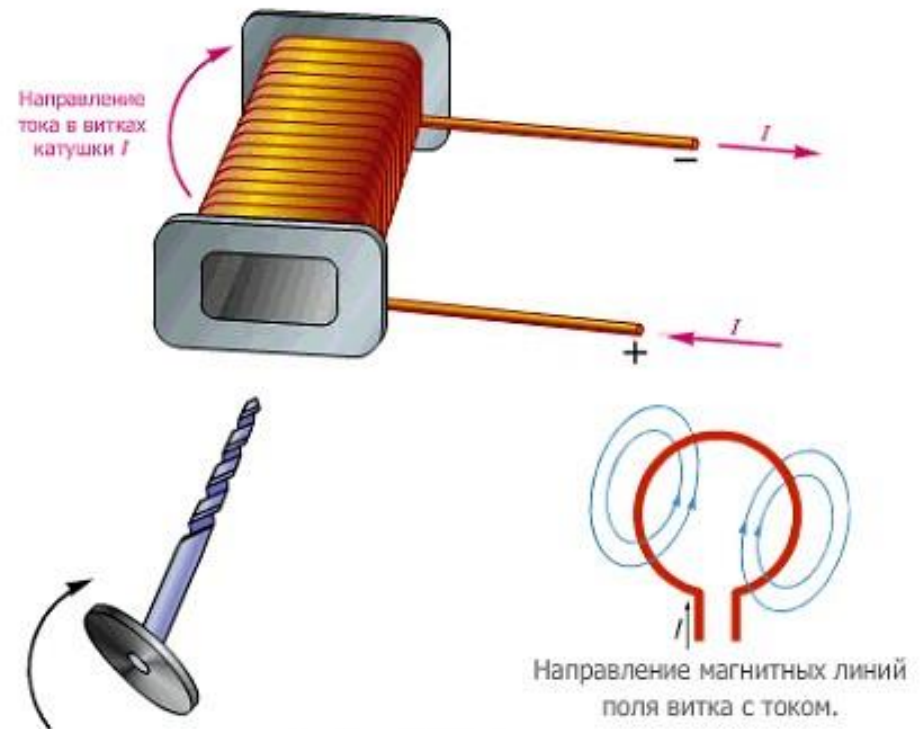
Определение направления магнитных линий  
вокруг прямолинейного проводника с током

Если поступательное движение буравчика совпадает  
с направлением тока в проводе, то вращение рукоятки  
буравчика указывает направление магнитных силовых линий.

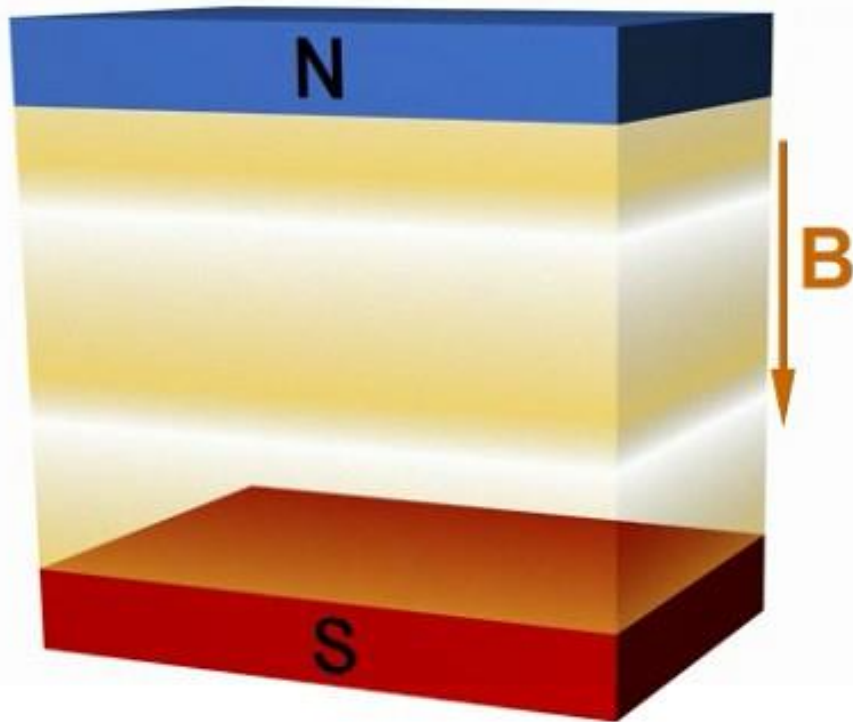


Определение направления магнитных линий  
поля внутри катушки с током

Если рукоятку буравчика вращать по направлению тока в витках,  
то его поступательное движение совпадает с направлением  
магнитных линий внутри катушки.



## Действие магнитного поля на проводник с током





Поместить проводник  
в поле



Замкнуть цепь

Определить направление  
электромагнитной силы

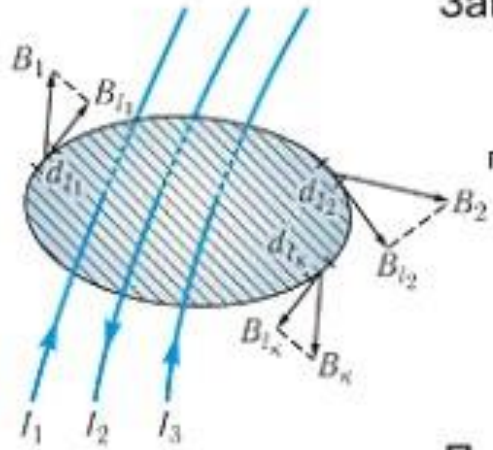
Расположение полюсов 

Расположение полюсов 

Изменить направление тока

Вертикальное расположение проводника

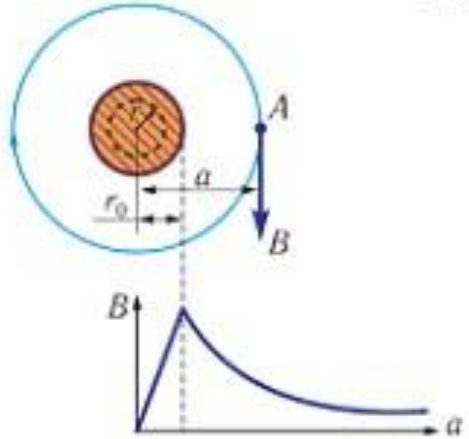
### Закон полного тока



Циркуляция вектора магнитной индукции по произвольному замкнутому контуру пропорциональна полному току, пронизывающему поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\oint B_l dl = \mu_0 \Sigma I$$

### Поле прямого тока



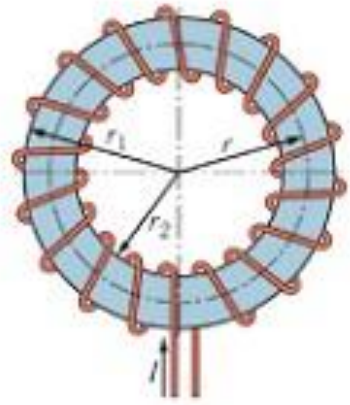
Если точка *A* магнитного поля находится за пределами проводника, т. е.  $r_0 < a$ :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Если точка *A* магнитного поля находится внутри проводника т. е.  $r < r_0$ :

$$B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi r_0^2}$$

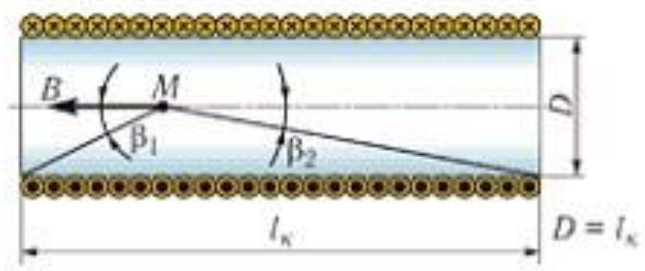
### Поле тока кольцевой катушки



$$B = \frac{\mu_0 I \cdot W}{2\pi r}$$

*r* — любой радиус внутри катушки от  $r_2$  до  $r_1$

### Поле тока цилиндрической катушки



Магнитная индукция в любой точке *M* на оси катушки:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot W}{2l_k} (\cos\beta_1 + \cos\beta_2)$$



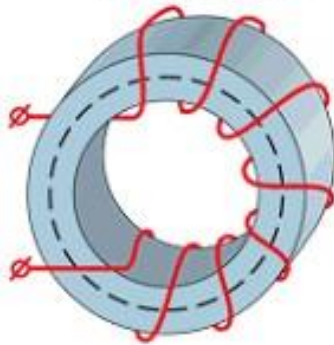
# Магнитная цепь

Устройство, содержащее сердечники из ферромагнитных материалов, через которые замыкается магнитный поток, называется **магнитной цепью**.

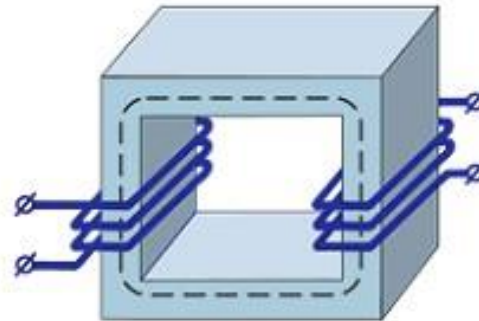
## Примеры магнитных цепей

### Однородная магнитная цепь

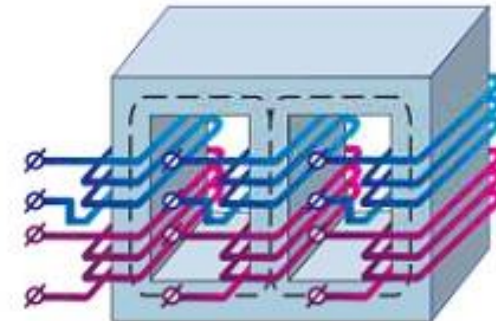
Катушка с тороидальным сердечником



Однофазный трансформатор

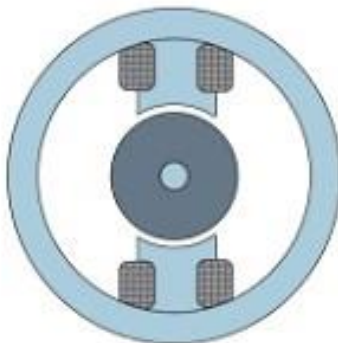


Трехфазный трансформатор

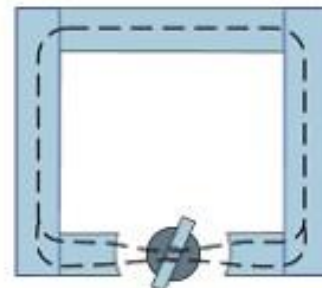


### Неоднородная магнитная цепь

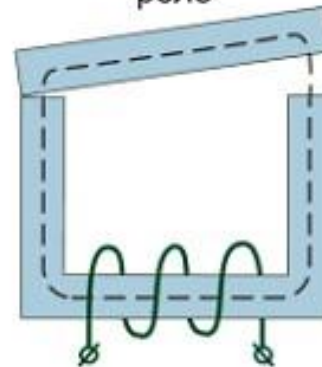
Машина постоянного тока



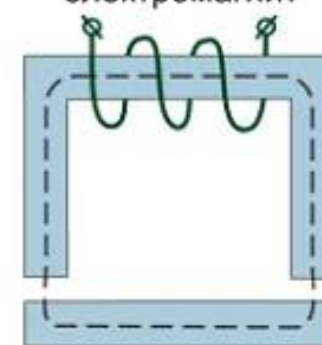
Магнитоэлектрический измерительный механизм



Электромагнитное реле



Подъемный электромагнит





## Закон Ома для неразветвленной магнитной цепи

Магнитный поток прямо пропорционален магнитодвижущей силе ( $IW, A$ ) и обратно пропорционален полному сопротивлению магнитной цепи ( $R_M, 1/Гн$ ).

$$\Phi = \frac{IW}{\Sigma R_M}; \text{ Вб}$$

Формула сопротивления участка магнитной цепи:

$$R_M = \frac{l}{\mu_0 S} \cdot \frac{1}{\mu_{\text{н}}}$$

## Законы Кирхгофа для магнитных цепей

### 1-й закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма магнитных потоков в узле магнитной цепи равна нулю.

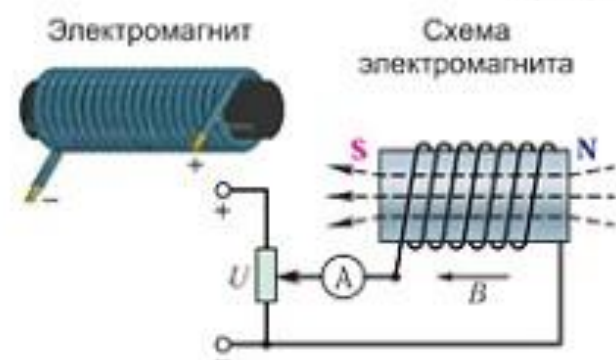
$$\Sigma \Phi_i = 0$$

### 2-й закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма МДС, действующих в контуре магнитной цепи, равна алгебраической сумме магнитных напряжений на отдельных участках контура.

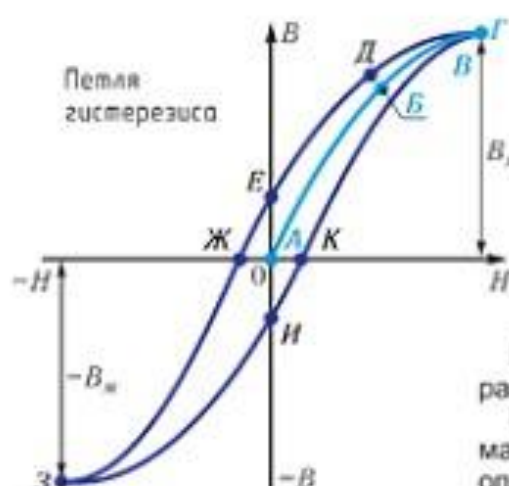
$$\Sigma IW = \Sigma H_i l_i \text{ или } \Sigma IW = \Sigma \Phi_i R_{Mi}$$

## Электромагнит



**Электромагнит** — катушка из изолированной медной проволоки (обмотка), намотанная на сердечник из ферромагнитного материала.

Если по обмотке электромагнита пропускать постоянный ток, то сердечник намагничивается: один его конец принимает свойства северного полюса (N), а другой — южного (S)



Кривая  $ABBF$  — это кривая первоначального намагничивания, которая получается при увеличении тока в катушке электромагнита, так как напряженность магнитного поля ( $H, A/m$ ) зависит от силы тока ( $I, A$ ) в катушке.

$$H = \frac{IW}{l}, \text{ A/m}$$

$W$  — число витков в катушке,  
 $l$  — длина магнитной линии, м

При уменьшении напряженности поля сердечник размагничивается по кривой  $ГДЕ$ . Все ферромагнитные материалы стремятся сохранить магнитное состояние. Поэтому размагничивание стержня опаздывает по сравнению с уменьшением напряженности поля. Это явление называется **магнитным гистерезисом**.

## Расчет магнитных цепей

### Прямая задача расчета неразветвленной неоднородной магнитной цепи

В прямой задаче требуется определить МДС, которая необходима для получения заданного магнитного потока или магнитной индукции.

Алгоритм расчета:

1. Разбить магнитную цепь (рисунок 1) на однородные участки. Определить длины этих участков ( $l_i$ ) и их сечения ( $S_i$ ).
2. По формуле  $B_i = \frac{\Phi}{S_i}$ , определить магнитную индукцию на каждом участке ( $\Phi = \text{const}$ ).
3. Определить необходимую напряженность магнитного поля  $H_i$  для каждого участка (рисунок 2) и магнитное напряжение  $H_i \cdot l_i$ .
4. По закону полного тока определить МДС, необходимую для создания в данной цепи магнитного потока  $\Phi$ .

$$\sum I \cdot W = \sum H_i l_i$$

Рисунок 1.  
Неразветвленная неоднородная магнитная цепь

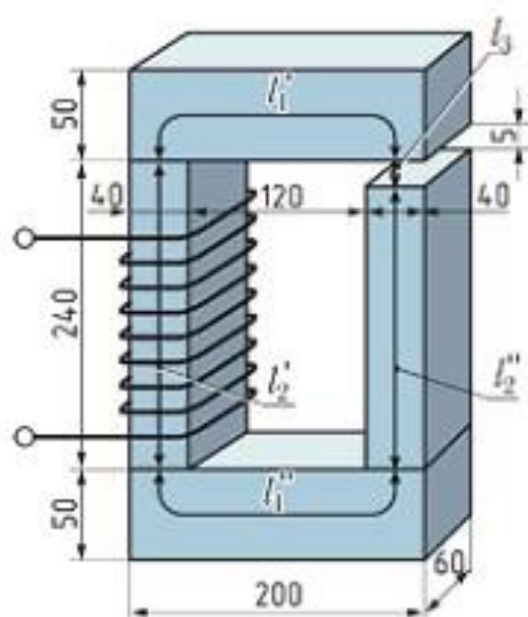
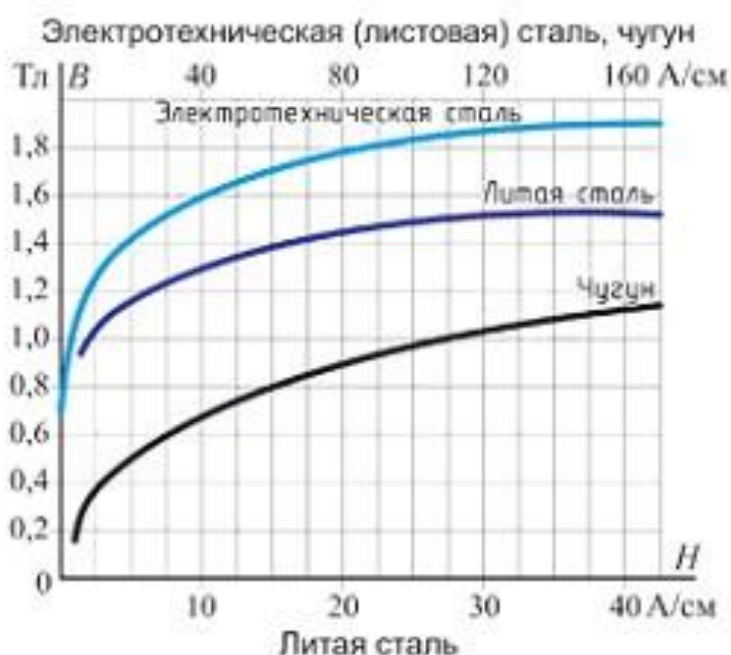


Рисунок 2.  
Кривые намагничивания основных ферромагнитных материалов

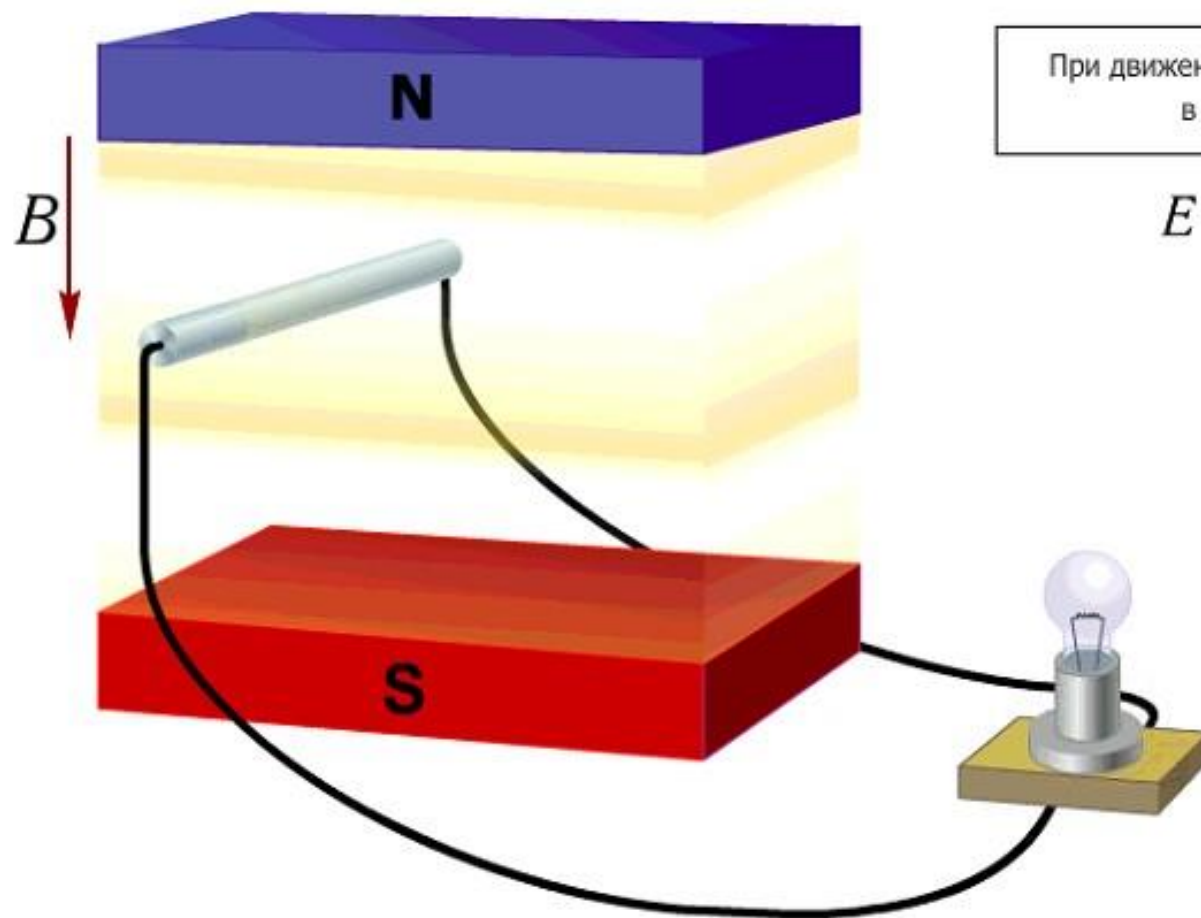


### Обратная задача расчета неразветвленной неоднородной магнитной цепи

В обратной задаче требуется определить магнитный поток (магнитную индукцию) в сердечнике, который возникает под действием заданной МДС.

# Явление электромагнитной индукции

## Явление электромагнитной индукции



При движении проводника в магнитном поле в нем индуцируется ЭДС.

$$E = B \cdot v \cdot l \cdot \sin\alpha$$

- Движение проводника
- Движение магнита
- Определение направления тока

- Явление электромагнитной индукции
- Примеры индуцированной ЭДС





# Потокосцепление. Индуктивность. Взаимная индуктивность

Потокосцепление катушки, Вебер (Вб)

$$\Psi_K = w \cdot \Phi$$

Собственная индуктивность, Генри (Гн)

$$L = \frac{\Psi_K}{I}$$

Индуктивность катушки, Генри (Гн)

$$L = \frac{\mu_a S w^2}{l}$$



Собственное потокосцепление

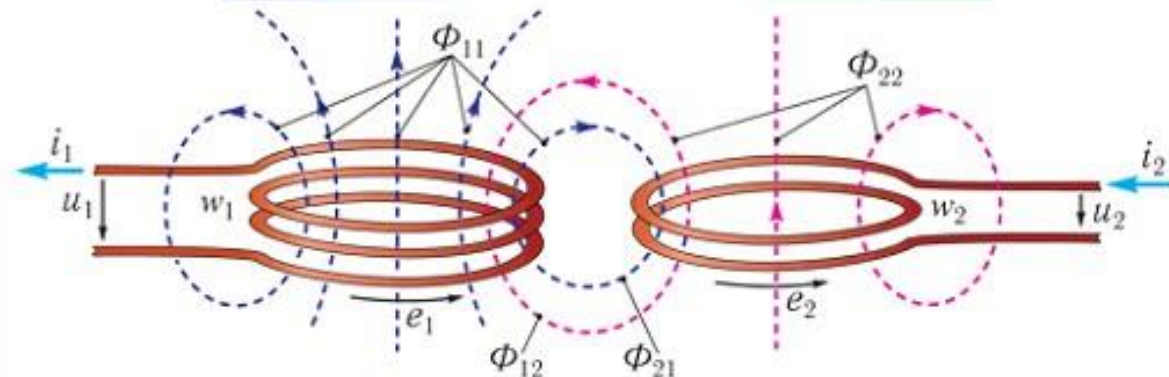
$$\Psi_{11} = w_{11} \Phi_{11} = L_1 i_1$$

$$\Psi_{22} = w_{22} \Phi_{22} = L_2 i_2$$

ЭДС самоиндукции

$$e_{L1} = -L_1 \frac{di_1}{dt}$$

$$e_{L2} = -L_2 \frac{di_2}{dt}$$



Взаимное потокосцепление

$$\Psi_{12} = w_1 \Phi_{12} = M_{12} i_2$$

$$\Psi_{21} = w_2 \Phi_{21} = M_{21} i_1$$

ЭДС взаимной индукции

$$e_{M1} = -M \frac{di_2}{dt}$$

$$M_{12} = M_{21} = M$$

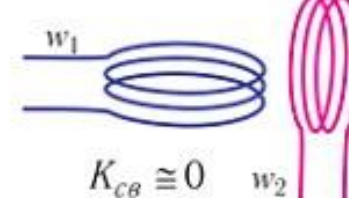
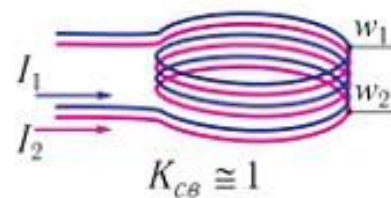
(принцип взаимности)

$$e_{M2} = -M \frac{di_1}{dt}$$

Взаимоиндуктивность двух катушек на одном магнитопроводе

$$M = \frac{\mu_a W_1 W_2 \cdot S}{l}, \text{ Гн}$$

Коэффициент связи

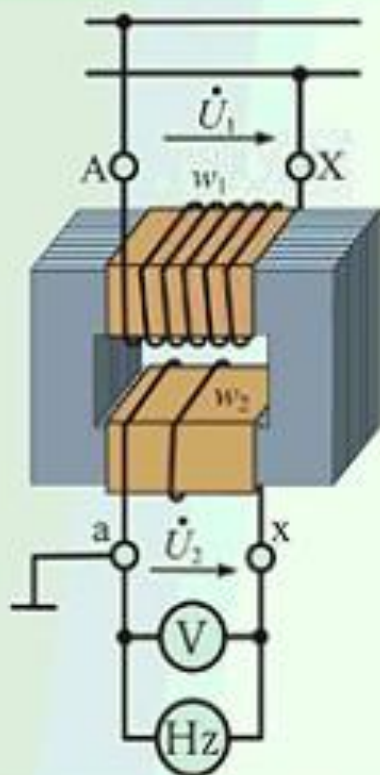


$$K_{св} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \downarrow 1$$



## Измерительные трансформаторы

Используются для расширения пределов измерения приборов, для измерений в высоковольтных цепях.



### Трансформаторы напряжения

Работают в условиях, близких к холостому ходу.

Это понижающие трансформаторы, имеющие  $U_{2H} = 100 \text{ В}$ .

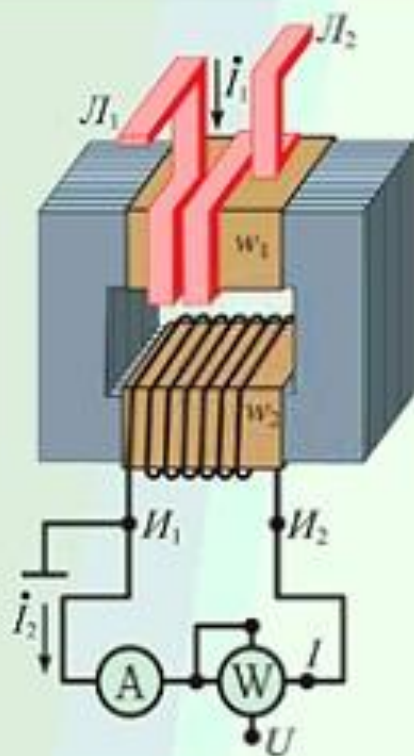
В паспорте указываются  $S_H, U_{1H}, U_{2H}$ , класс точности.

A-X — первичная обмотка ( $w_1$ );

a-x — вторичная обмотка ( $w_2$ );

V — вольтметр;

Hz — частотомер



### Трансформаторы тока

Работают в условиях, близких к короткому замыканию.

Это повышающий трансформатор, имеющий  $I_{2H} = 5 \text{ А}$ .

В паспорте указывается  $I_{1H}, I_{2H}$ , класс точности, максимальное сопротивление измерительных приборов.

$L_1$  и  $L_2$  — первичная обмотка ( $w_1$ );

$I_1$  и  $I_2$  — вторичная обмотка ( $w_2$ );

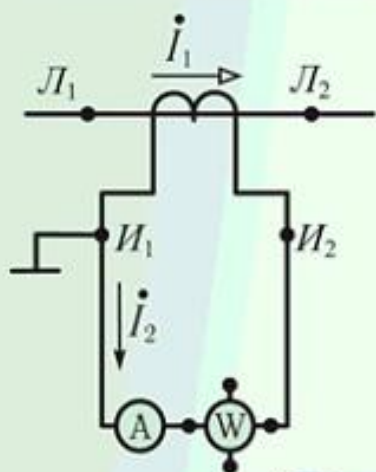
A — амперметр;

W — ваттметр

## Трансформаторы тока

Ток в первичной обмотке  $I_1$  не зависит от сопротивления приборов, включенных во вторичную обмотку.

Условное обозначение



Внешний вид



## Измерительные клещи Трансформаторы тока с разъемным сердечником

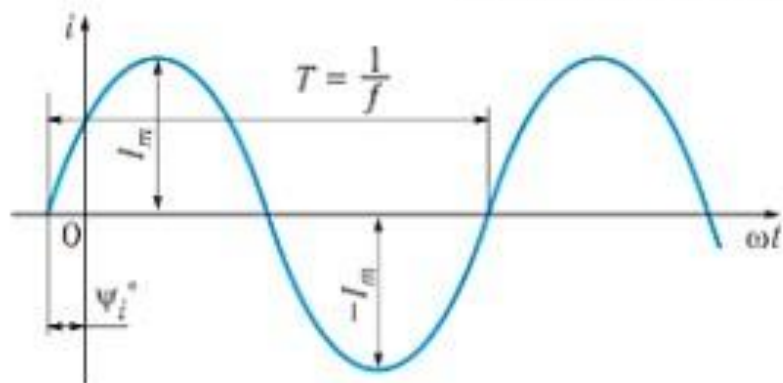
Для измерения тока



Для измерения  
активной мощности



## Синусоидальный ток



$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

$I_m$  — амплитудное значение тока, А;

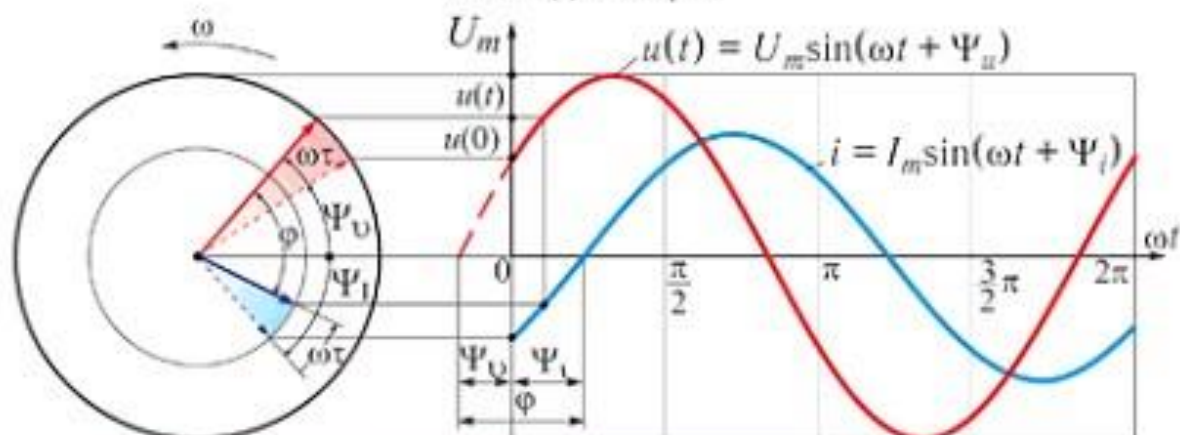
$T$  — период синусоиды, с;

$1/T = f$  — частота тока, Гц;

$\omega = 2\pi f$  — угловая частота, рад/с;

$\psi_i$  — начальная фаза, рад, град

### Угол сдвига фаз

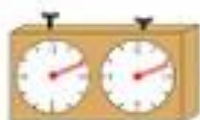


### Сдвиг по фазе

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин

$$\varphi = \psi_u - \psi_i, \text{ [градусы, радианы]}$$

Напряжение опережает ток:  $\psi_u > 0, \psi_i < 0, \varphi > 0$



Действующее значение тока определяется по тепловому действию

$$\text{Мощности: } p_{\text{ср}} = i^2 R, \quad P_{\text{ср}} = I^2 R$$



$$\text{Энергия: } W_{\text{ср}} = \int_0^T i^2 R dt \Leftrightarrow W_{\text{ср}} = I^2 R t$$

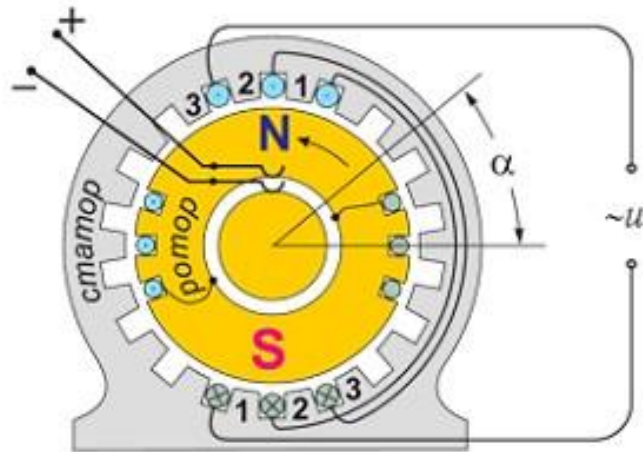
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Соотношение между амплитудным и действующим значениями

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$



## Получение синусоидальной ЭДС



При вращении ротора в проводниках 1, 2 и 3 обмотки статора наводятся равные ЭДС:  $e_1, e_2, e_3$ .  
 Их общая ЭДС:  $e = e_1 + e_2 + e_3$ .  
 Она изменяется синусоидально:  $e = E_m \sin \alpha$ .

За один оборот ротора  $\alpha$  изменится на  $2\pi$  и произойдет полный цикл колебаний ЭДС (за время  $T$ ).

Угловая скорость вращения ротора:  $\omega = \alpha/t = e2\pi/T = 2\pi f$ .

ЭДС 2-полюсного генератора:  $e = E_m \sin \omega t$ .

Количество периодов синусоидальной ЭДС за один оборот ротора равно числу пар полюсов генератора  $p$ .

$p \cdot \alpha$  — электрический угол;

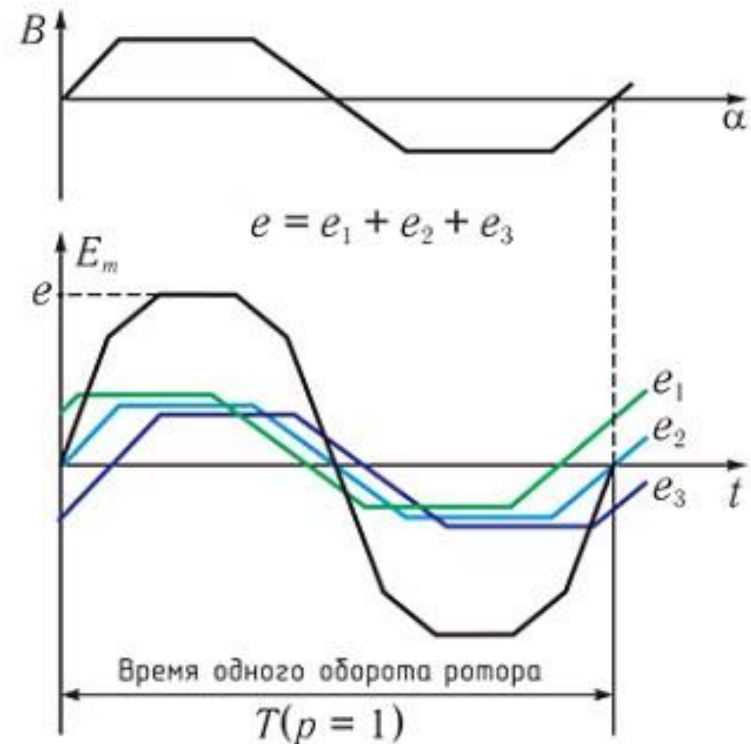
$$\frac{p \cdot \alpha}{t} = \omega = 2\pi f; \text{ рад/с — угловая частота}$$

При  $f = 250$  Гц  $\omega = 314$  рад/с

Для получения промышленной частоты 50 Гц ротор генератора должен иметь частоту вращения:

- двухполюсного —  $n = 3000$  об./мин,
- четырехполюсного —  $n = 1500$  об./мин,
- шестиполюсного —  $n = 1000$  об./мин.

$$n = \frac{60f}{p}$$





## Сложение синусоидальных величин

### Графическое сложение по временной диаграмме

#### Пример 1.

Два приемника соединены параллельно.

Ток первого:  $i_1 = 10\sin\omega t$

Ток второго:  $i_2 = 10\sin(\omega t + 90^\circ)$

Нужно определить:

Ток в неразветвленной части цепи,  $i(t)$ ,  $I$

Решение:

Мгновенные значения токов зависят от фазы  $\omega t$

При  $\omega t = 0$   $i_1 = 10\sin 0^\circ = 0$ ,

$i_2 = 10\sin 90^\circ = 10 \text{ A}$

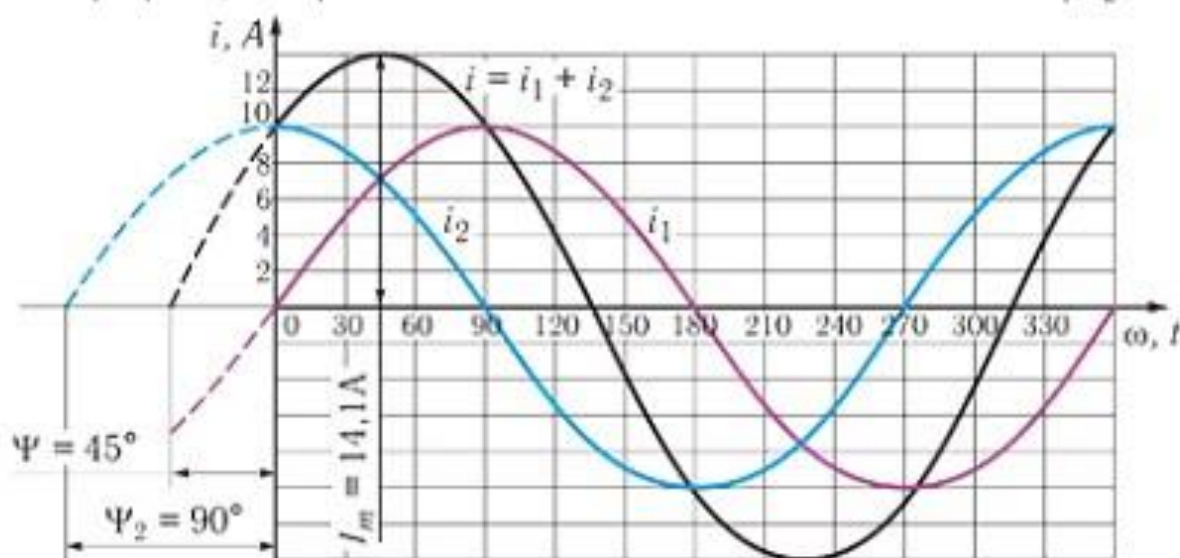
$i = i_1 + i_2 = 0 + 10 = 10 \text{ A}$

Аналогично определяются токи  $i_1$ ,  $i_2$  и  $i$  при других значениях угла  $\omega t$

Результаты расчета:

$\omega t, \text{ }^\circ\text{C}$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$i_1, \text{ A}$	0	5	8,6	10	8,6	5	0	-5	-8,6	-10	-8,6	-5	0
$i_2, \text{ A}$	10	8,6	5	0	-5	-8,6	-10	-8,6	-5	0	5	8,6	10
$i, \text{ A}$	10	13,6	13,6	10	3,6	-3,6	-10	-13,6	-13,6	-10	-3,6	3,6	10

Графики, построенные по мгновенным значениям токов  $i_1$ ,  $i_2$  и  $i$

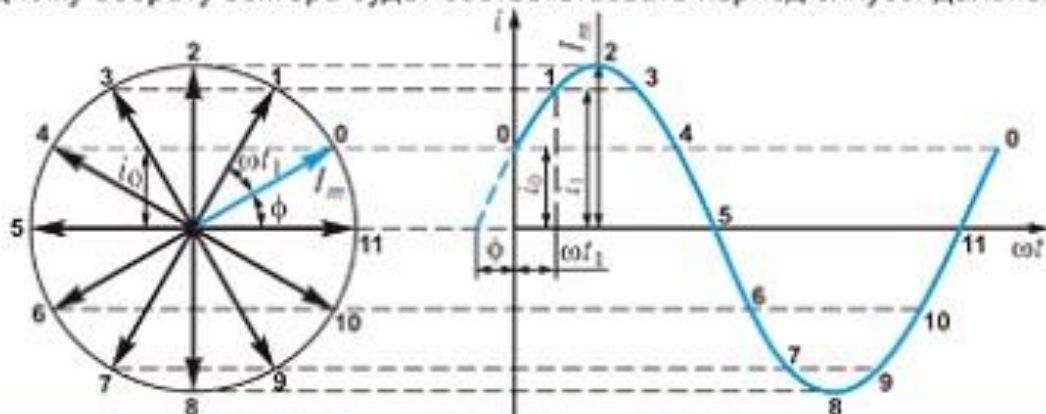


Ответ:  $i = 14,1 \sin(\omega t + 45^\circ)$ ;

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{14,1}{\sqrt{2}} = 10 \text{ A}$$

## Сложение синусоидальных величин Обоснование векторной диаграммы

Если вектор  $I_m$  вращать против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega = 2\pi f$ , то его проекция на ось ординат будет изменяться по закону синуса. Причем одному обороту вектора будет соответствовать период синусоидального тока.



Если на одном чертеже изобразить при помощи векторов несколько синусоидальных величин одинаковой частоты, то получится — векторная диаграмма

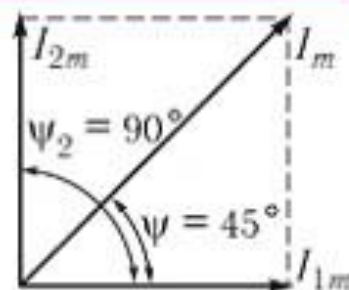
**Пример 1. Решение при помощи векторной диаграммы**

Дано:  $i_1 = 10\sin\omega t$ ,  
 $i_2 = 10\sin(\omega t + 90^\circ)$

Решение: • построим векторы  $I_{1m}$  и  $I_{2m}$  в масштабе на одном чертеже

- сложим векторы  $\vec{I}_m = \vec{I}_{1m} + \vec{I}_{2m}$
- суммарный вектор амплитуды тока в неразветвленной части,  $I_m = 14,1$  А,
- начальная фаза тока  $\psi = 45^\circ$

Ответ:  $i = 14,1\sin(\omega t + 45^\circ)$ ;  $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 10$  А

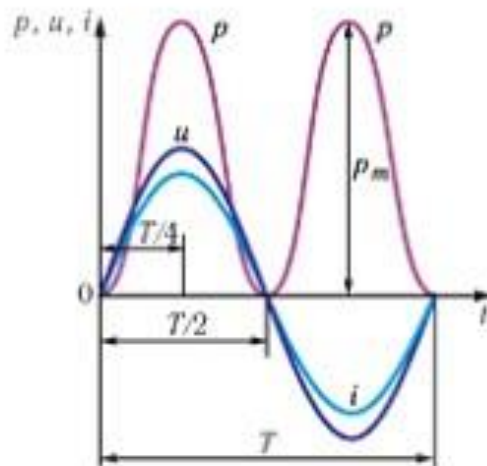
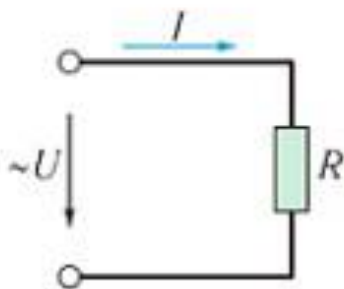


**Общий алгоритм построения векторной диаграммы.**

1. Выбрать масштаб, подходящий для всех изображаемых величин.
2. Построить один из векторов в масштабе, направив его произвольно.
3. Остальные векторы построить в масштабе с учетом их углов сдвига фаз относительно первого вектора.
4. Считать что векторы вращаются против часовой стрелки.  
Оси  $x$  и  $y$  не чертить.
5. При необходимости выполнить сложение векторов по правилу многоугольника.

## Идеальные цепи переменного тока

### Цепь переменного тока с активным сопротивлением



Уравнения мгновенных значений тока и напряжения в цепи с активным сопротивлением:

$$u = U_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin \omega t$$

В цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе ( $\varphi = 0$ ).

Векторная диаграмма



### Закон Ома для цепи с активным сопротивлением

Внешне ничем не отличается от формулы для постоянного тока, однако в формулу входят не постоянные, а действующие значения переменного тока и напряжения.

Закон Ома:

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

### Мощность

Положительное значение мощности указывает на то, что цепь всегда потребляет энергию от источника, преобразуя ее в теплоту.

Среднюю за период мощность называют активной ( $P$ , Вт).

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

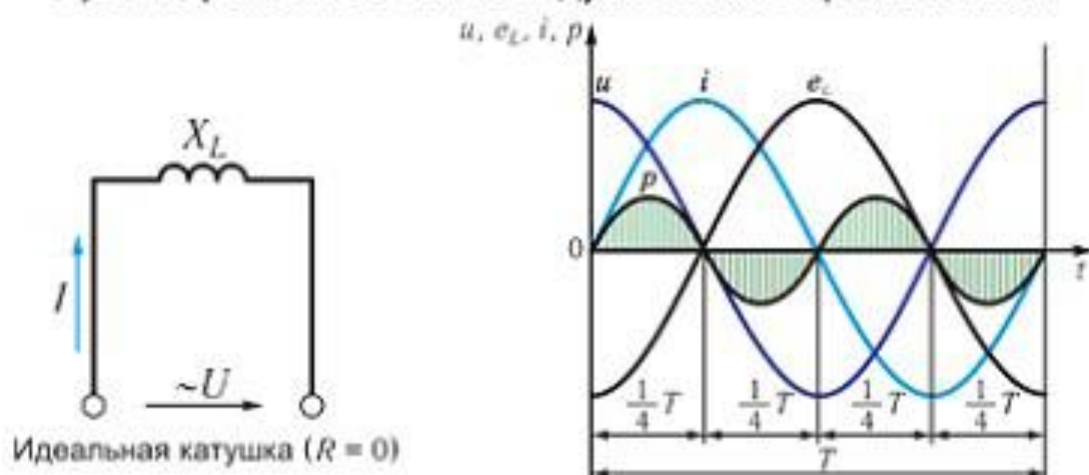
Единица измерения активной мощности в СИ — ватт (Вт).

Более крупные единицы: 1 МВт =  $10^6$  Вт, 1 кВт =  $10^3$  Вт.



## Идеальные цепи переменного тока

### Цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением



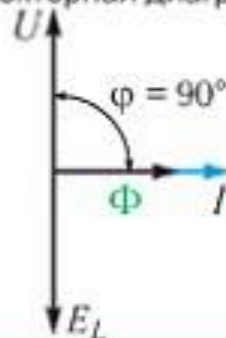
Уравнения мгновенных значений тока и напряжения в цепи с индуктивным сопротивлением:

$$i = I_m \sin(\omega t)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

В цепи с индуктивным сопротивлением ток отстает от напряжения на угол  $90^\circ$  ( $\varphi = 90^\circ$ ).

Векторная диаграмма



### Закон Ома для цепи с индуктивным сопротивлением

Произведение  $\omega \cdot L$  называется **индуктивным сопротивлением** и вычисляется по формуле:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi fL, \text{ Ом}$$

Закон Ома:

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

### Мощность

Цепь с индуктивностью то потребляет энергию, то отдает ее в таком же количестве источнику. Через катушку протекает переменный ток, называемый реактивным. Реактивные токи бесполезно загружают линию электропередачи и электрический генератор. Мощность в цепи с индуктивностью называется **реактивной индуктивной мощностью** ( $Q_L$ ; вар)

$$Q_L = UI = I^2 X_L$$

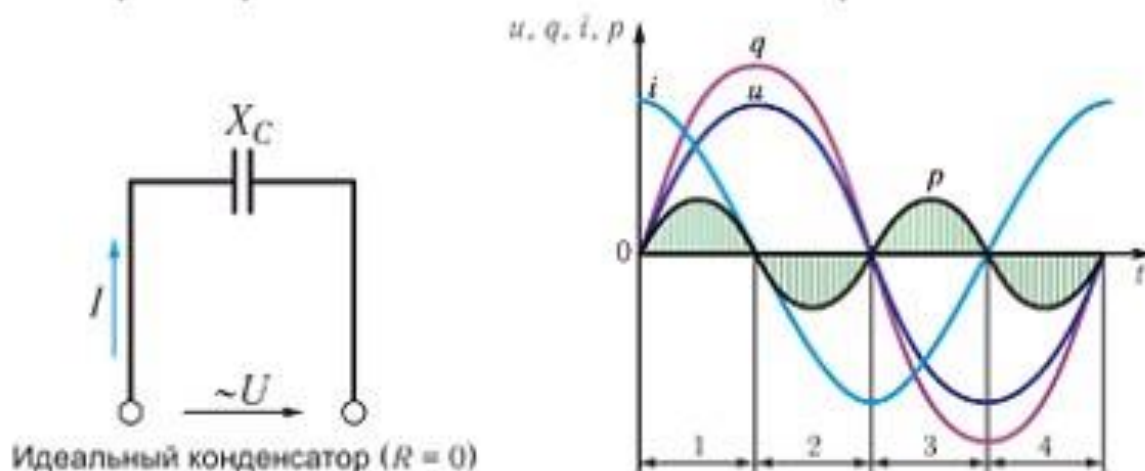
Единица измерения реактивной мощности в СИ — вольт-ампер реактивный (вар).

Более крупные единицы: 1 Мвар =  $10^6$  вар, 1 квар =  $10^3$  вар.



## Идеальные цепи переменного тока

### Цепь переменного тока с емкостным сопротивлением



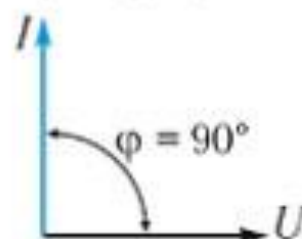
Уравнения мгновенных значений тока и напряжения в цепи с емкостным сопротивлением:

$$i = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

$$u = U_m \sin \omega t$$

В цепи с емкостным сопротивлением ток опережает напряжение на угол  $90^\circ$  ( $\varphi = 90^\circ$ ).

Векторная диаграмма



### Закон Ома для цепи с емкостным сопротивлением

Значение  $1/\omega C$  называется **емкостным сопротивлением** и вычисляется по формуле:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f C}, \text{ Ом}$$

Закон Ома:

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

### Мощность

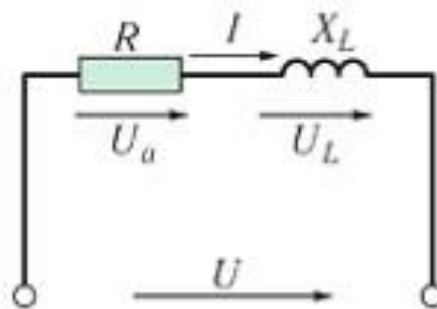
В цепи с емкостью происходит периодический обмен энергией между источником и конденсатором. Мощность в цепи с емкостью называется реактивной емкостной мощностью ( $Q_C$ ; вар).

$$Q_C = UI = I^2 X_C$$

Единица измерения реактивной мощности в СИ — вольт-ампер реактивный (вар).

Более крупные единицы: 1 Мвар =  $10^6$  вар, 1 квар =  $10^3$  вар.

## Последовательное соединение активного сопротивления и катушки индуктивности



Уравнения мгновенных значений тока и напряжения в цепи:

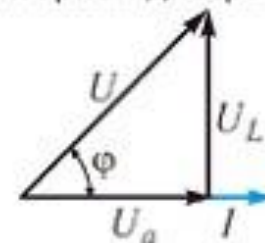
$$i = I_m \sin \omega t$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

В цепи с последовательным соединением активного сопротивления и катушки индуктивности напряжение  $U$  опережает ток  $I$  по фазе на угол  $\varphi$ .

$$0^\circ > \varphi < 90^\circ$$

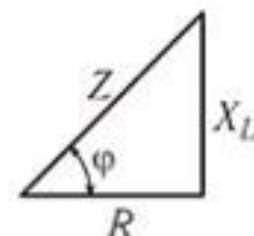
Векторная диаграмма



Треугольник сопротивлений

$R$  — активное сопротивление, Ом;  
 $X_L$  — индуктивное сопротивление, Ом;  
 $Z$  — полное сопротивление, Ом

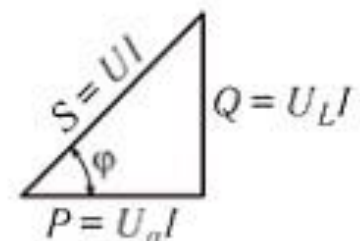
$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$



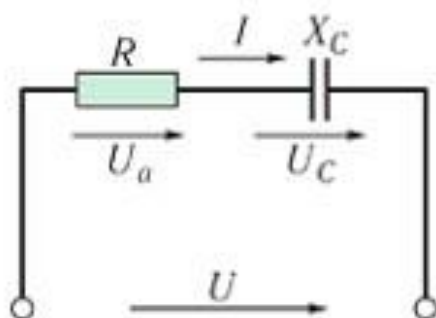
Треугольник мощностей

$P$  — активная мощность, Вт;  
 $Q_L$  — реактивная индуктивная мощность, вар;  
 $S$  — полная мощность, В · А

$$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$$



## Последовательное соединение активного сопротивления и конденсатора



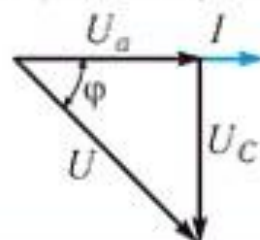
Уравнения мгновенных значений тока и напряжения в цепи:

$$i = I_m \sin \omega t$$

$$u = U_m \sin(\omega t - \varphi)$$

В цепи с последовательным соединением активного сопротивления и конденсатора напряжение  $U$  **отстает** от тока  $I$  по фазе на угол  $\varphi$ .  
 $0^\circ > \varphi > -90^\circ$

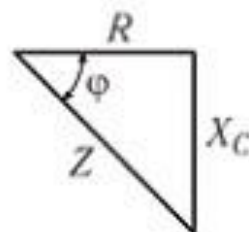
Векторная диаграмма



Треугольник сопротивлений

$R$  — активное сопротивление, Ом;  
 $X_C$  — емкостное сопротивление, Ом;  
 $Z$  — полное сопротивление, Ом

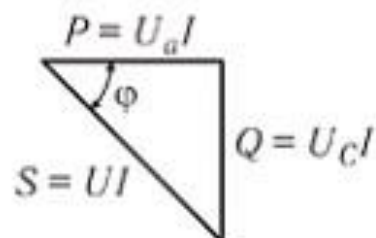
$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$



Треугольник мощностей

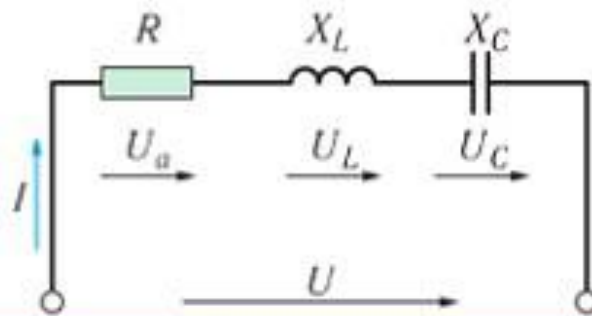
$P$  — активная мощность, Вт;  
 $Q_C$  — реактивная емкостная мощность, вар;  
 $S$  — полная мощность, В · А

$$S = \sqrt{P^2 + Q_C^2}$$





## Последовательное соединение активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора



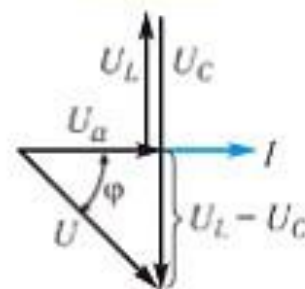
Уравнения мгновенных значений тока и напряжения в цепи:

$$i = I_m \cdot \sin \omega t$$

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t \pm \varphi)$$

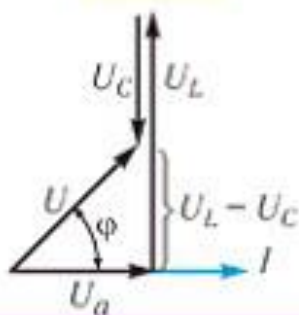
Векторная диаграмма при активно-емкостном характере цепи

$$U_C > U_L$$



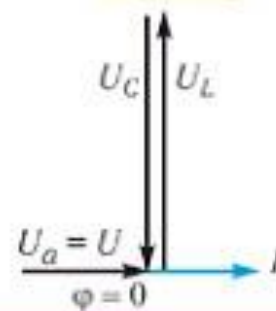
Векторная диаграмма при активно-индуктивном характере цепи

$$U_L > U_C$$



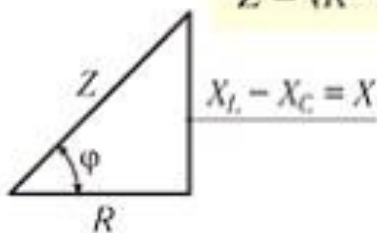
Векторная диаграмма при резонансе напряжений

$$U_C = U_L$$

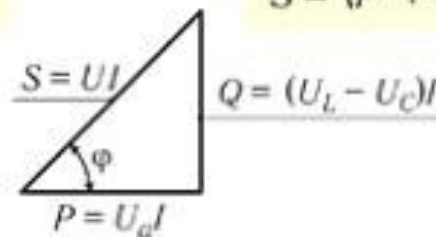


Треугольники сопротивлений и мощностей

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

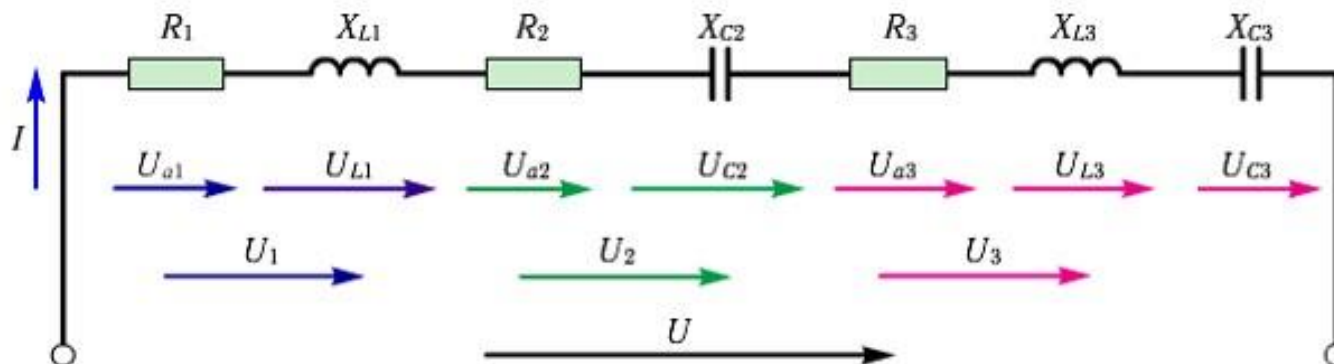


$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}$$

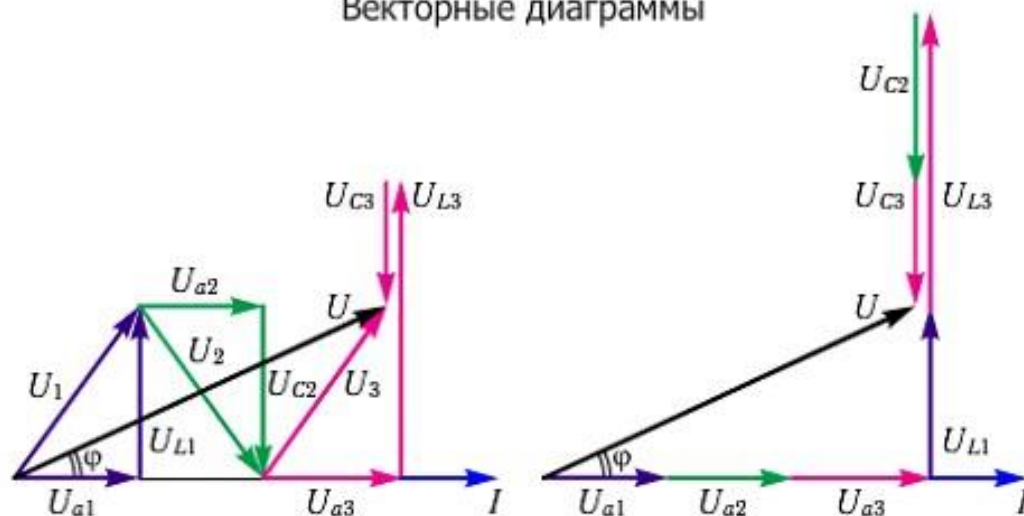


# Неразветвленные цепи переменного тока

Общий случай последовательного соединения элементов цепи переменного тока

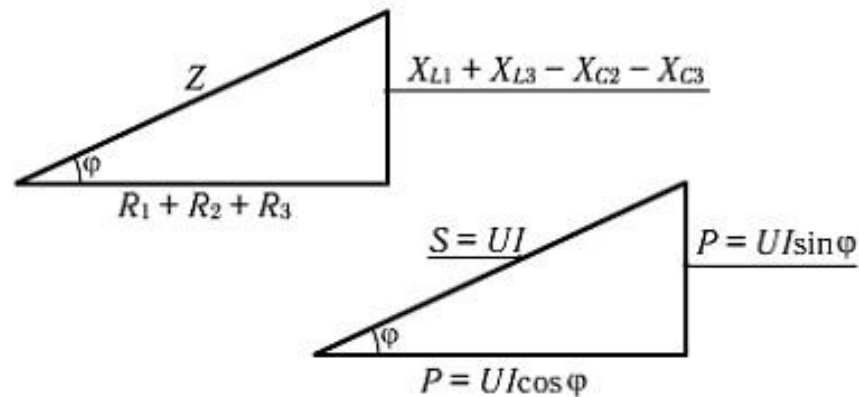


Векторные диаграммы



Пример построения векторных диаграмм

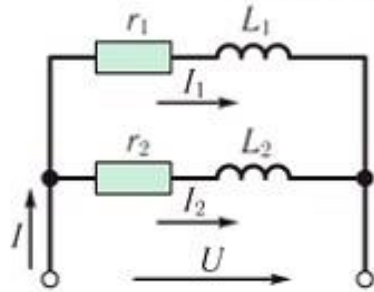
Треугольники сопротивлений и мощностей



Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = R/Z = P/S$$

## Расчет разветвленной цепи переменного тока Метод активных и реактивных составляющих токов



### Алгоритм расчета

1. Определение полного сопротивления всех ветвей

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}$$

2. Определение токов ветвей по закону Ома

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{U}{Z_2}$$

3. Определение активных составляющих токов ветвей

$$I_{a1} = I_1 \cdot \cos\varphi_1; \quad \cos\varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}$$

$$I_{a2} = I_2 \cdot \cos\varphi_2; \quad \cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}$$

4. Определение реактивных составляющих токов ветвей

$$I_{p1} = I_1 \cdot \sin\varphi_1; \quad \sin\varphi_1 = \frac{X_{L1}}{Z_1}$$

$$I_{p2} = I_2 \cdot \sin\varphi_2; \quad \sin\varphi_2 = \frac{X_{L2}}{Z_2}$$

5. Определение активного и реактивного тока в цепи

$$I_a = \sum I_{ai}; \quad I_a = I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_p = \sum I_{pi}; \quad I_p = I_{p1} + I_{p2}$$

Активные составляющие токов ( $I_{ai}$ ) ветвей всегда складываются. Реактивные составляющие токов ветвей ( $I_{pi}$ ) с индуктивностью — положительные, а с емкостью — отрицательные.

6. Определение тока в цепи до разветвления

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$$

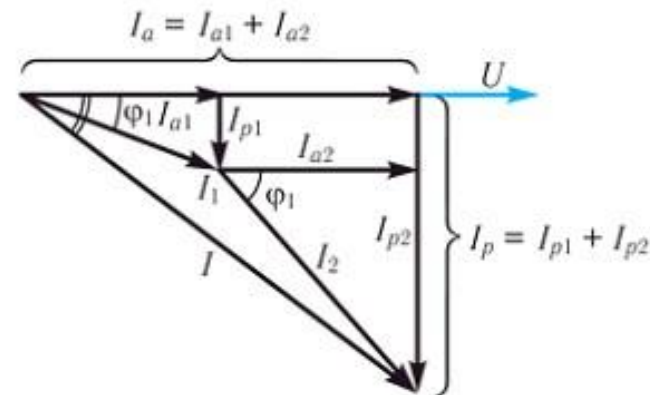
7. Расчет мощностей электрической цепи

Активная мощность:  $P = U \cdot I \cos\varphi = U \cdot I_a$ , Вт

Реактивная мощность:  $Q = U \cdot I \sin\varphi = U \cdot I_p$ , В · Ар

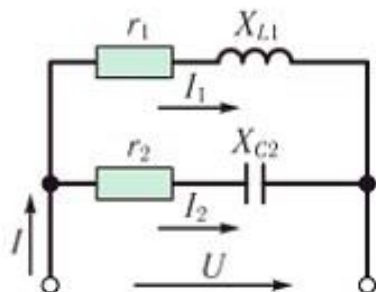
Полная мощность:  $S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , В · А

8. Построение векторной диаграммы по активным и реактивным составляющим токов ветвей





## Расчет разветвленной цепи переменного тока Метод проводимостей



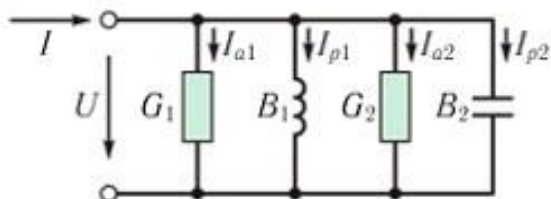
### Алгоритм расчета

1. Определение полного сопротивления каждой ветви в исходной схеме

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{C2}^2}$$

2. Преобразование исходной схемы электрической цепи в расчетную



3. Расчет проводимостей ветвей в расчетной схеме.

$$G_1 = \frac{R_1}{Z_1^2} ; B_1 = \frac{X_{L1}}{Z_1^2} ; G_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} ; B_2 = \frac{X_{C2}}{Z_2^2}$$

4. Расчет полных проводимостей ветвей

$$Y_1 = \sqrt{G_1^2 + B_1^2}$$

$$Y_2 = \sqrt{G_2^2 + B_2^2}$$

5. Расчет проводимостей всей электрической цепи

АКТИВНАЯ:  $G = \Sigma G_i = G_1 + G_2$

РЕАКТИВНАЯ:  $B = \Sigma B_i = B_1 - B_2$

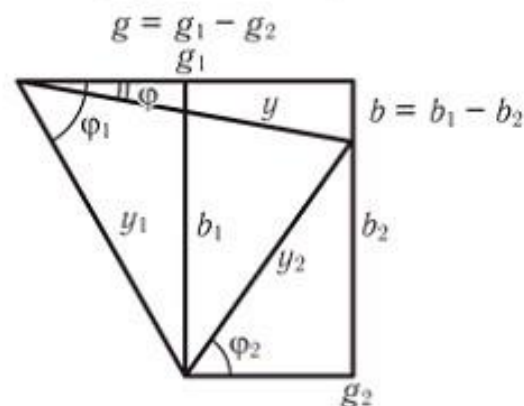
ПОЛНАЯ:  $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$

Активные проводимости всегда положительны.  
Реактивные проводимости катушек — положительные,  
а конденсаторов — отрицательные.

6. Определение токов ветвей и всей цепи

$$I_1 = U \cdot Y_1 ; I_2 = U \cdot Y_2 ; I = U \cdot Y$$

7. Построение треугольника проводимостей



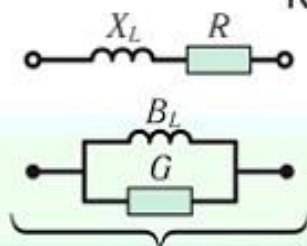
8. Расчет мощностей электрической цепи

$$P = U^2 \cdot G, \text{ Вт}$$

$$Q = U^2 \cdot B, \text{ вар}$$

$$S = U^2 \cdot Y, \text{ В} \cdot \text{А}$$

## Компенсация реактивной мощности



- асинхронные двигатели ( $\cos\varphi_{\text{потр}} = 0,2 \div 0,85$ );
- индуктивные нагревательные приборы;
- трансформаторы ( $\cos\varphi_{\text{потр}} = 0,5 \div 0,9$ );
- воздушные линии электропередач

Полная мощность в цепи переменного тока:  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

$P$  — полезная активная мощность;

$Q$  — реактивная мощность

Ток в приемнике:  $I = \frac{S}{U} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{U}$

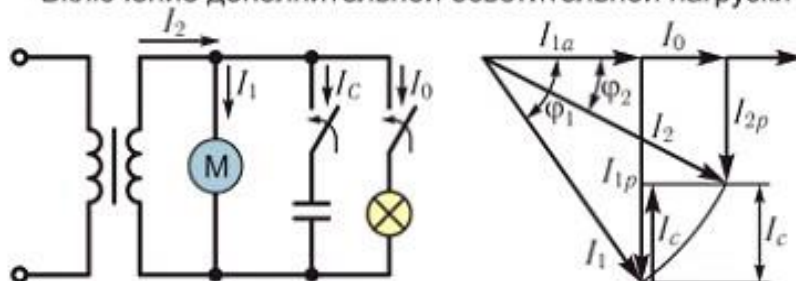
Зависит от реактивной мощности  $Q$ .

Чем ток больше, тем больше потери энергии во всех элементах электрической цепи.

### Способы компенсации реактивной мощности

Естественные	Искусственные
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Правильный выбор мощности электродвигателей переменного тока и трансформаторов.</li> <li>2. Рациональная эксплуатация без недогрузки и работы вхолостую.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Включение батареи конденсаторов параллельно приемникам.</li> <li>2. Включение дополнительной осветительной нагрузки.</li> </ol>

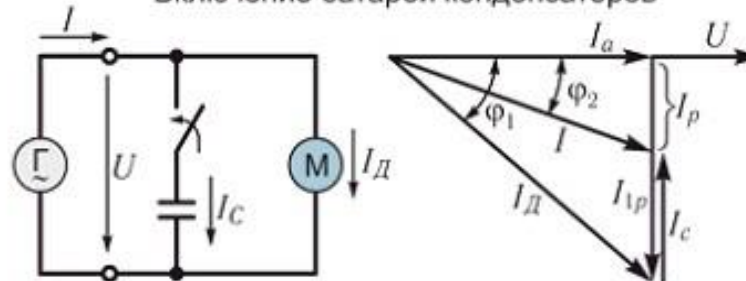
Включение дополнительной осветительной нагрузки



$$S = \sqrt{(P^2 + P_0)^2 + (Q_L - Q_C)^2}$$

Дополнительную осветительную нагрузку  $P_0$  можно присоединить только после разгрузки трансформатора при помощи батареи конденсаторов ( $-Q_C$ ).

Включение батареи конденсаторов



$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}$$

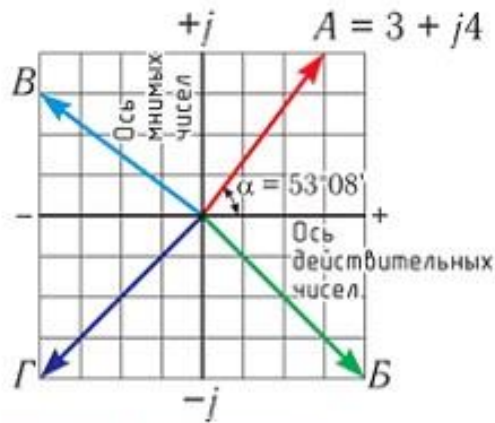
$Q_C$  — мощность батареи конденсаторов.

$$\cos\varphi_{\text{потр}} = \frac{P_{\text{потр}}}{S_{\text{потр}}}$$

Коэффициент мощности

В России минимально допустимый  $\cos\varphi_{\text{потр}} \geq 0,93$

## Общие сведения о комплексных числах



### 1. Алгебраическая форма записи.

$$\dot{A} = A' \pm jA''$$

$j = \sqrt{-1}$  — мнимая единица

$$\dot{A} = 3 + j4 \quad \dot{B} = +4 - j4$$

$$\dot{B} = -4 + j3 \quad \dot{C} = -4 - j4$$

$j$  — поворотный множитель.  
Умножением числа  $A''$  на  $j$  получается мнимое число  $jA''$ , изображаемое вектором, направленным по мнимой положительной полуоси.

$|\dot{A}| = \sqrt{|A'|^2 + |A''|^2}$  — модуль комплекса

$$|\dot{A}| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$$

$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|A'|}{|A''|}$  — аргумент комплекса

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{4}{3} = 1,33; \quad \alpha = 53^\circ 08'$$

### 2. Показательная форма записи.

$$\dot{A} = |\dot{A}| e^{j\alpha}$$

$$\dot{A} = 5e^{j53^\circ 08'} \quad \dot{B} = 5e^{+j143^\circ 08'} \quad \dot{B} = 5,64e^{-j45^\circ} \quad \dot{C} = 5,64e^{j255^\circ}$$

### 3. Тригонометрическая форма записи.

$$\dot{A} = |\dot{A}| \cos \alpha + j|\dot{A}| \sin \alpha$$

$$\dot{A} = 5e^{j53^\circ 08'} \Rightarrow A = 5 \cdot \cos 53^\circ 08' + j5 \sin 53^\circ 08' = 3 + j4$$

$$\dot{B} = 5,64e^{-j45^\circ} \Rightarrow \dot{B} = 5,64 \cos(-45^\circ) + j5,64 \cdot \sin(-45^\circ) = 4 - j4$$

Для сложения и вычитания комплексные числа представляют в алгебраической форме

$$\dot{A} \pm \dot{B} = A' + jA'' \pm B' + jB'' = A' \pm B' + j(A'' \pm B'')$$

$$\dot{A} + \dot{B} = 3 + j4 + 4 - j4 = 3 + 4 + j(4 - 4) = 7$$

$$\dot{A} - \dot{B} = 3 + j4 - (4 - j4) = 3 - 4 + j(4 + 4) = -1 + j8$$

Для деления и умножения комплексные числа представляют в показательной форме

$$\dot{C} = \dot{A} \cdot \dot{B} = |\dot{A}| e^{j\alpha} \cdot |\dot{B}| e^{j\beta} = |\dot{A}| \cdot |\dot{B}| e^{j(\alpha + \beta)}$$

$$C = 5e^{j53^\circ 08'} \cdot 5e^{j143^\circ 08'} = 25e^{j196^\circ 08'}$$

$$\dot{D} = \dot{A} / \dot{B} = \frac{|\dot{A}| e^{j\alpha}}{|\dot{B}| e^{j\beta}} = \frac{|\dot{A}|}{|\dot{B}|} e^{j(\alpha - \beta)}$$

$$D = \frac{5e^{j53^\circ 08'}}{5e^{j143^\circ 08'}} = 1e^{-j90^\circ}$$

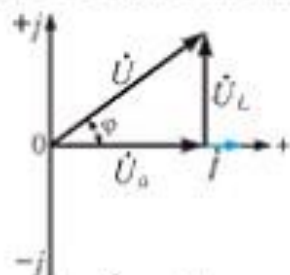
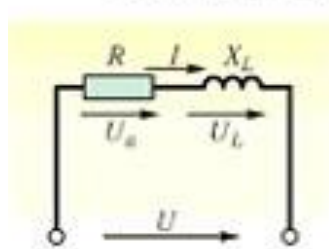


## Выражение основных электрических величин комплексными числами

Комплексные значения тока, напряжения, ЭДС:  $\dot{I}$ ,  $\dot{U}$ ,  $\dot{E}$

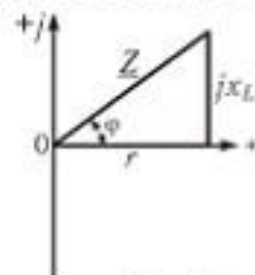
Комплексные значения сопротивления, проводимости, мощности:  $\underline{Z}$ ,  $\underline{Y}$ ,  $\underline{S}$

Последовательное соединение активного сопротивления и индуктивности



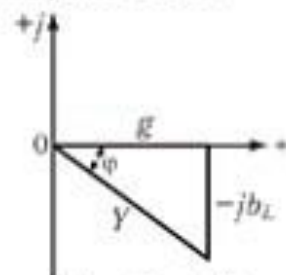
$$\dot{I} = I \cdot e^{j0}$$

$$\dot{U} = U_R + jU_L = U e^{j\varphi}$$



$$\underline{Z} = R + jX_L$$

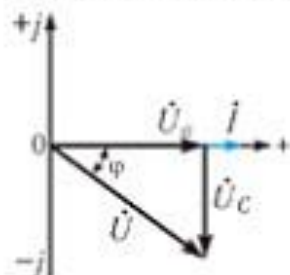
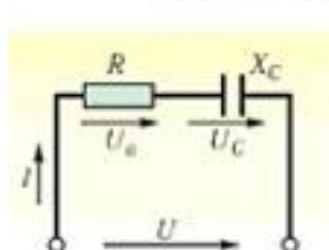
$$\underline{Z} = Z e^{j\varphi}$$



$$\underline{Y} = G - jB_L$$

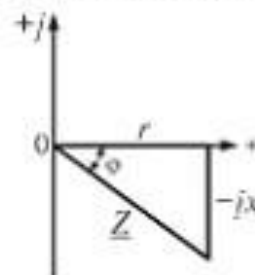
$$\underline{Y} = Y \cdot e^{-j\varphi}$$

Последовательное соединение активного сопротивления и емкости



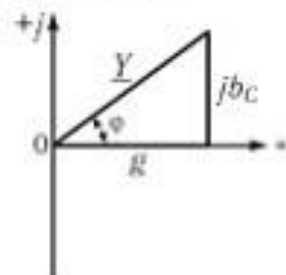
$$\dot{I} = I \cdot e^{j0}$$

$$\dot{U} = U_R - jU_C = U e^{-j\varphi}$$



$$\underline{Z} = R - jX_C$$

$$\underline{Z} = Z e^{-j\varphi}$$



$$\underline{Y} = G + jB_C$$

$$\underline{Y} = Y \cdot e^{j\varphi}$$

Комплексное значение мощности

$$\underline{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^*$$

$$\underline{S} = P \pm jQ$$

$\dot{I}^*$  — сопряженный комплекс тока, А;

$P$  — активная составляющая мощности, Вт;

$Q$  — реактивная мощность, ВАР

Закон Ома в комплексной форме:  $\dot{I} = \dot{U} / \underline{Z} = \dot{U} \cdot \underline{Y}$

Первый закон Кирхгофа в комплексной форме:  $\sum \dot{I} = 0$

Второй закон Кирхгофа в комплексной форме:  $\sum \dot{E} = \sum \dot{I} \underline{Z}$

Комплексное эквивалентное сопротивление  
неразветвленной цепи:

$$\underline{Z}_{\Sigma} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$$

Комплексное эквивалентное сопротивление  
двух параллельных ветвей:

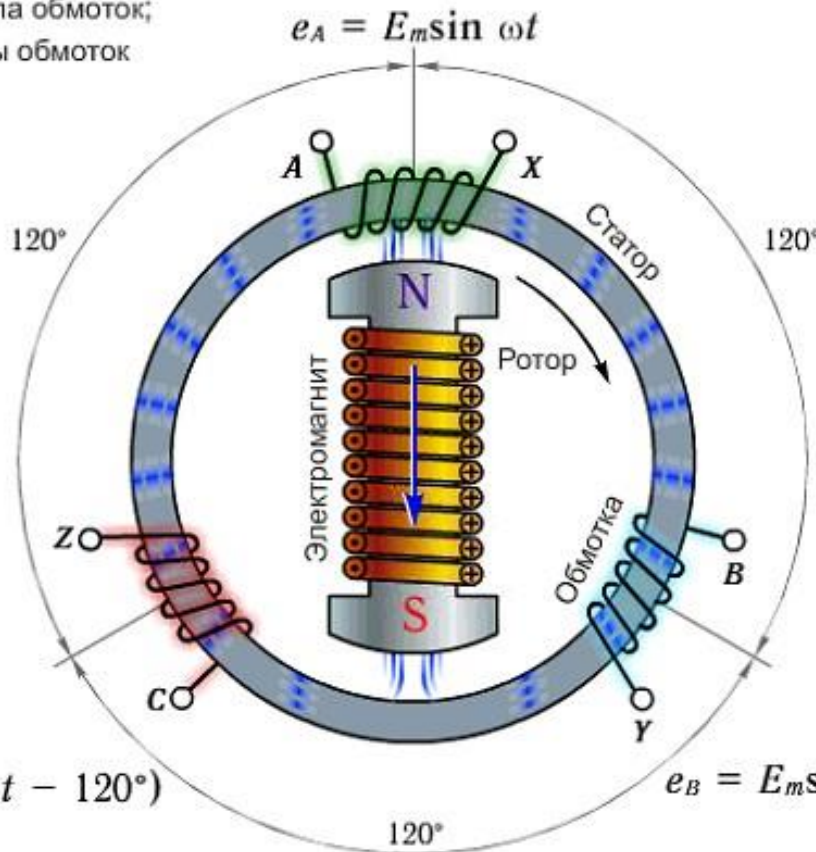
$$\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$$

Комплексная проводимость:  $\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \dots + \underline{Y}_n$   
( $n$  — параллельных ветвей)

# Трёхфазные цепи

## Трёхфазная симметричная система ЭДС

$A, B, C$  — начала обмоток;  
 $X, Y, Z$  — концы обмоток



$$e_C = E_m \sin (\omega t - 120^\circ)$$

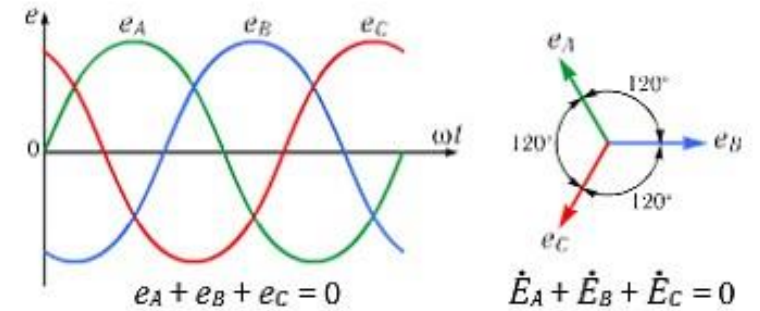
$$e_B = E_m \sin (\omega t - 240^\circ)$$

При вращении ротора будет вращаться его магнитный поток и в каждой обмотке статора наводятся синусоидальная ЭДС.

Трёхфазная симметричная система

Трёхфазная электрическая цепь

Векторная диаграмма симметричной системы ЭДС

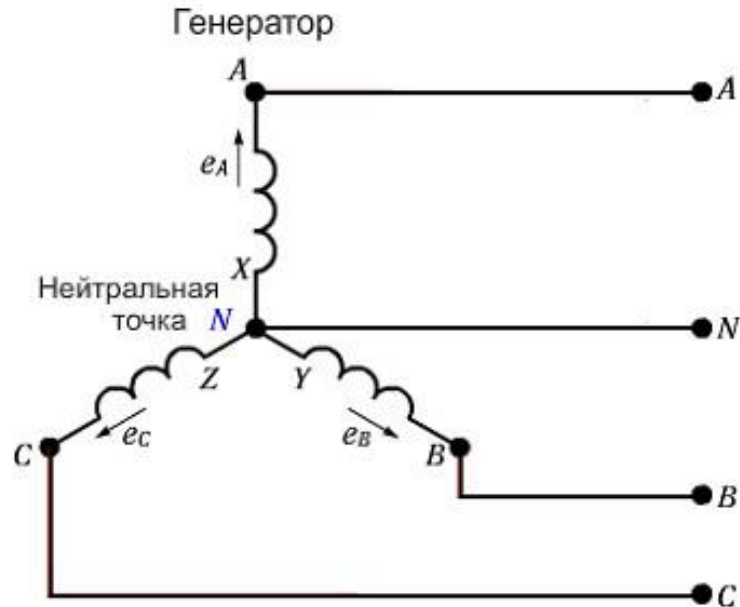


Последовательность  $A \rightarrow B \rightarrow C$  называют прямой последовательностью фаз.

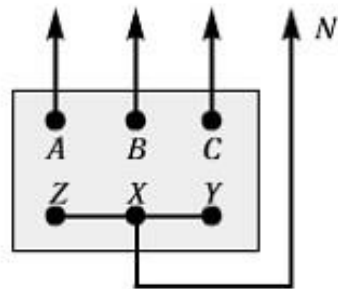
Система трех переменных ЭДС одной амплитуды и частоты, сдвинутых по фазе на  $120^\circ$ , называется трехфазной симметричной системой ЭДС.

# Трёхфазные цепи

## Соединение обмоток генератора звездой



Соединение звездой обмоток статора на контактном щитке генератора



### Определение «звезды»

Присоединение нагрузки

Линейный провод

Нулевой (нейтральный) провод

Фазное напряжение

Линейное напряжение

Фазный ток

Линейный ток

Соотношения

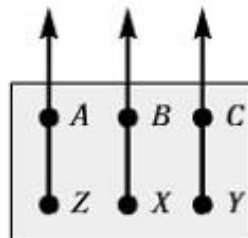
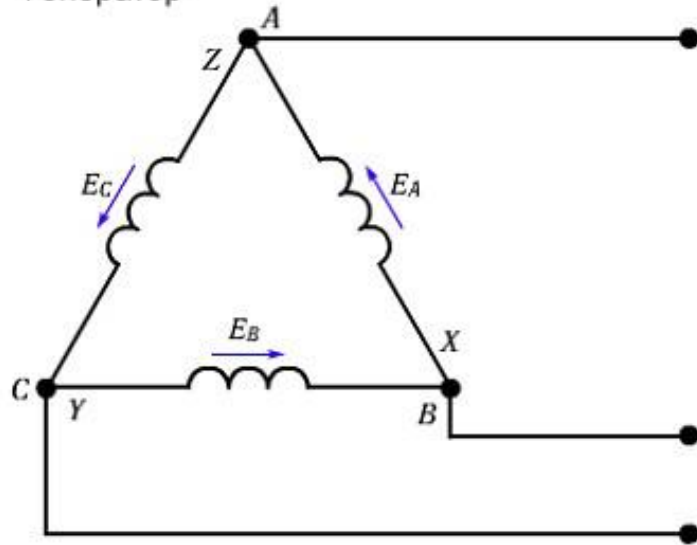
При соединении обмоток генератора **звездой** концы обмоток  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  электрически соединяются в одну точку, которая называется **нулевой** или **нейтральной** ( $N$ )



# Трёхфазные цепи

## Соединение обмоток генератора треугольником

Генератор



Определение «треугольника»

Присоединение нагрузки

Линейный провод

Фазное напряжение

Линейное напряжение

Фазный ток

Линейный ток

Соотношения

Неправильное соединение

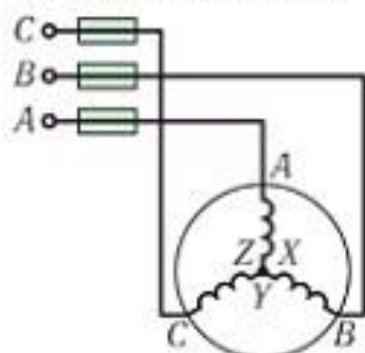
При соединении обмоток генератора треугольником: конец обмотки фазы *A* соединяется с началом фазы *B*, конец фазы *B* соединяется с началом фазы *C*, конец фазы *C* соединяется с началом фазы *A*.

## Симметричные трёхфазные цепи

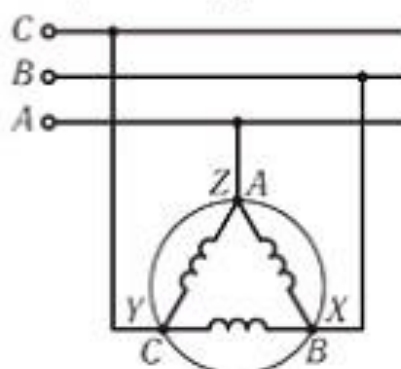
Трёхфазная цепь, в которой активные и реактивные сопротивления составляющих ее фаз одинаковы, называется **симметричной**.

Схемы соединения трёхфазного электродвигателя

Соединение звездой

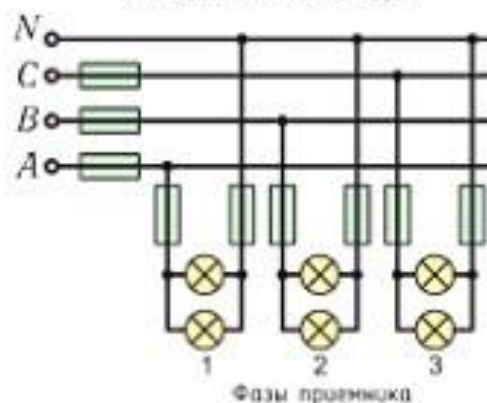


Соединение треугольником

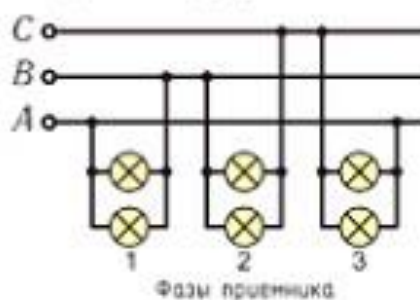


Схемы соединения трёхфазной осветительной нагрузки

Соединение звездой



Соединение треугольником



В симметричной цепи на зажимах приёмника действует симметричная система линейных напряжений при любой схеме его соединения. На расчетной схеме источник (генератор или трансформатор) не показывают и говорят, что приемник включен в трехфазную сеть.

Задача расчета трехфазной цепи состоит в определении фазных и линейных токов приемника, а также фазных мощностей приемника и мощности всей трехфазной цепи, при заданных линейных (фазных) напряжениях и сопротивлениях фаз.

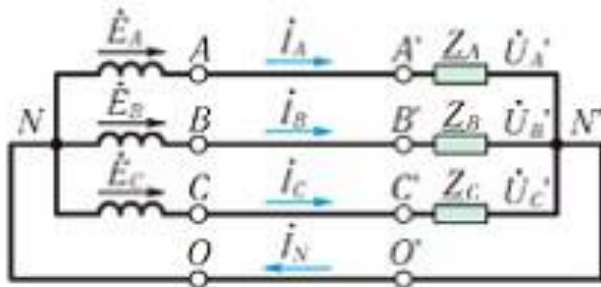
Для симметричной трёхфазной цепи достаточно провести расчет одной фазы, и применимы все формулы для расчёта однофазных цепей.

## Порядок расчета симметричной трехфазной цепи

Определяемые величины	Соединение звездой	Соединение треугольником
Полное фазное сопротивление	$Z_{\Phi} = \sqrt{R_{\Phi}^2 + X_{\Phi}^2}$ ( $Z_A, Z_B, Z_C$ )	$Z_{\Phi} = \sqrt{R_{\Phi}^2 + X_{\Phi}^2}$ ( $Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$ )
Фазное напряжение	$U_{\Phi} = U_{Л} / \sqrt{3}$ ( $U_A, U_B, U_C$ )	$U_{\Phi} = U_{Л}$ ( $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ )
Фазный ток (Закон Ома)	$I_{\Phi} = U_{\Phi} / Z_{\Phi}$ ( $I_A, I_B, I_C$ )	$I_{\Phi} = U_{\Phi} / Z_{\Phi}$ ( $I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}$ )
Линейный ток	$I_{Л} = I_{\Phi}$ ( $I_A, I_B, I_C$ )	$I_{Л} = \sqrt{3} I_{\Phi}$ ( $I_A, I_B, I_C$ )
Кэффициент мощности фазы	$\cos \varphi_{\Phi} = R_{\Phi} / Z_{\Phi}$ ( $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ )	$\cos \varphi_{\Phi} = R_{\Phi} / Z_{\Phi}$ ( $\varphi_{AB}, \varphi_{BC}, \varphi_{CA}$ )
<b>Мощность одной фазы</b>		
Активная	$P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi_{\Phi}$ ( $P_A, P_B, P_C$ )	$P_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi_{\Phi}$ ( $P_{AB}, P_{BC}, P_{CA}$ )
Реактивная	$Q_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi_{\Phi}$ ( $Q_A, Q_B, Q_C$ )	$Q_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi_{\Phi}$ ( $Q_{AB}, Q_{BC}, Q_{CA}$ )
Полная	$S_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi}$ ( $S_A, S_B, S_C$ )	$S_{\Phi} = U_{\Phi} I_{\Phi}$ ( $S_{AB}, S_{BC}, S_{CA}$ )
<b>Мощность трехфазной цепи</b>		
Активная	$P = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \cos \varphi$	
Реактивная	$Q = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \sin \varphi$	
Полная	$S = 3 U_{\Phi} I_{\Phi} = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л}$	



## Расчет четырехпроводной трехфазной цепи при несимметричной нагрузке



Четырехпроводная трехфазная цепь

В коротких линиях сопротивления проводов, соединяющих генератор и приемник, не учитываются.

Фазные напряжения приемника равны соответствующим фазным напряжениям генератора:

$$U_{A'} = U_A \quad U_{B'} = U_B \quad U_{C'} = U_C$$

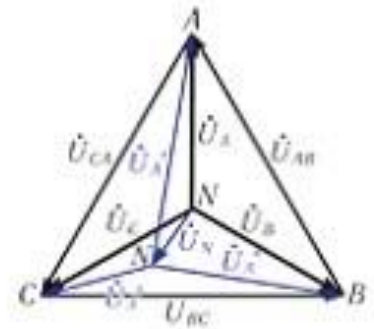
$$\begin{cases} \dot{U}_{A'} = U_A \\ \dot{U}_{B'} = U_A e^{-j120^\circ} \\ \dot{U}_{C'} = U_A e^{j120^\circ} \end{cases}$$

Если сопротивлениями линейных и нейтрального провода пренебречь нельзя, то необходимо определить напряжение смещения нейтрали:

$$\dot{U}_{NN'} = \frac{\dot{U}_A Y_A + \dot{U}_B Y_B + \dot{U}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_N}$$

Комплексы фазных напряжений приемника:

$$\begin{cases} \dot{U}_{A'} = \dot{U}_A - \dot{U}_{NN'} \\ \dot{U}_{B'} = \dot{U}_B - \dot{U}_{NN'} \\ \dot{U}_{C'} = \dot{U}_C - \dot{U}_{NN'} \end{cases}$$

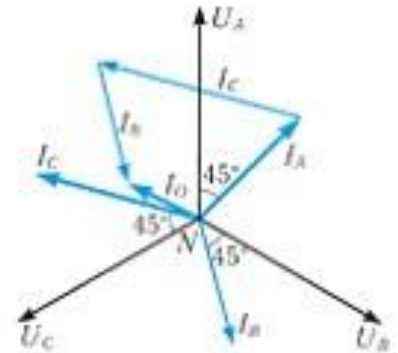


Фазные токи приемника определяются по закону Ома:

$$i_A = \dot{U}_{A'} / Z_A \quad i_B = \dot{U}_{B'} / Z_B \quad i_C = \dot{U}_{C'} / Z_C$$

Ток в нейтральном проводе определяется по первому закону Кирхгофа:

$$i_N = i_A + i_B + i_C$$



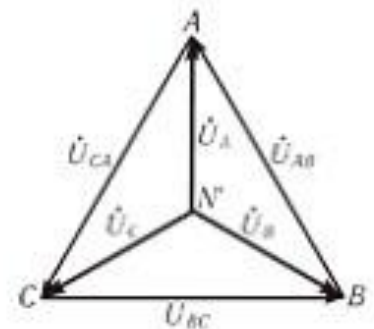
При наличии нейтрального провода, сопротивлением которого можно пренебречь

$$I_N = \infty; \quad U_{NN'} = 0$$

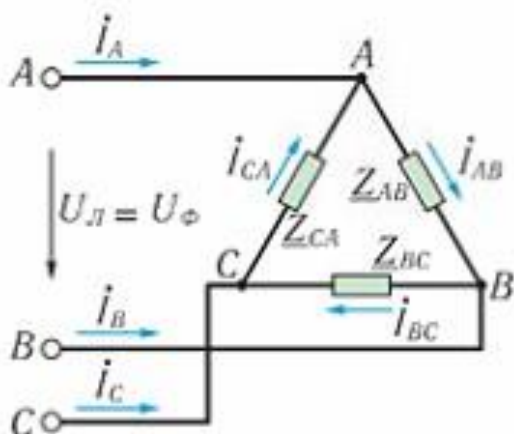
Фазные напряжения приемника энергии будут одинаковыми.

Нейтральный провод обеспечивает выравнивание напряжений на фазах потребителя при несимметричной нагрузке.

Во избежание разрыва цепи нейтрального провода в нем не устанавливают предохранители и выключатели



## Расчет несимметричной цепи при соединении нагрузки треугольником



Соединение приемников треугольником

Каждая фаза приемника находится под линейным напряжением

$$U_{\phi} = U_L = U_{AB} = U_{BC} = U_{CA}$$

Комплексные значения линейных (фазных) напряжений:

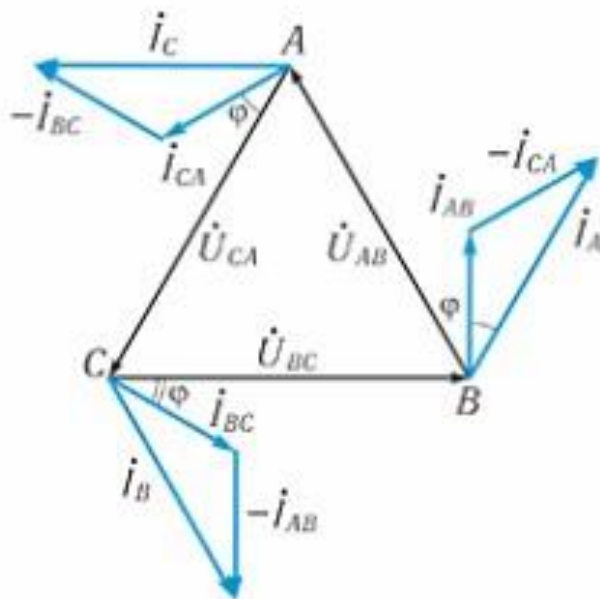
$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = U_L \\ \dot{U}_{BC} = U_L \cdot e^{-j120^\circ} \\ \dot{U}_{CA} = U_L \cdot e^{j120^\circ} \end{cases}$$

Фазные токи определяются по закону Ома:

$$\begin{cases} \dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} / Z_{AB} \\ \dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC} / Z_{BC} \\ \dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA} / Z_{CA} \end{cases}$$

Линейные токи определяют по первому закону Кирхгофа для каждого из трех узлов электрической цепи:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} \end{cases}$$



# Аварийные режимы в трехфазных цепях

## Симметричный режим работы трехфазной системы

Диаграмма токов

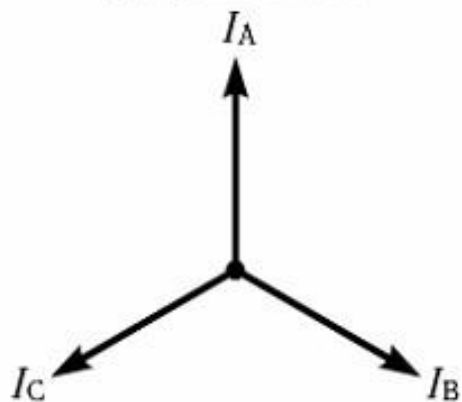
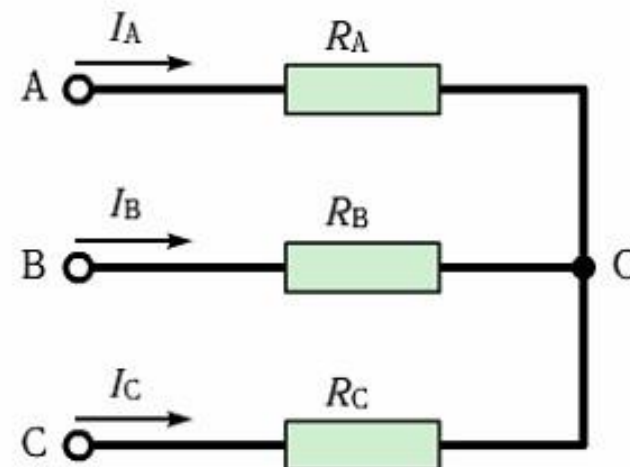
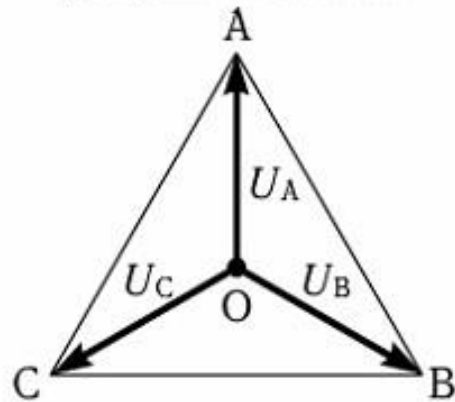
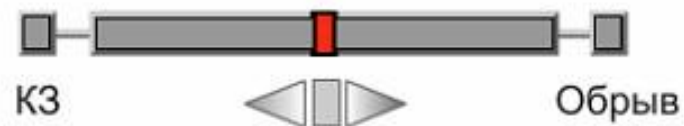


Диаграмма напряжений



Соединение нагрузки звездой без нулевого провода



С нулевым проводом



## Мощность трехфазной цепи при симметричном и несимметричном режимах

**Активная мощность цепи** — сумма активных мощностей фаз.

Для соединения по схеме звезда

$$P = P_A + P_B + P_C$$

$$P_A = U_A I_A \cos \varphi_A$$

$$P_B = U_B I_B \cos \varphi_B$$

$$P_C = U_C I_C \cos \varphi_C$$

Активная  
мощность  
цепи

Для соединения по схеме треугольник

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA}$$

$$P_{AB} = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB}$$

$$P_{BC} = U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC}$$

$$P_{CA} = U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}$$

**Реактивная мощность цепи** — алгебраическая сумма реактивных мощностей фаз

$$Q = \pm Q_A \pm Q_B \pm Q_C$$

$$Q_A = U_A I_A \sin \varphi_A$$

$$Q_B = U_B I_B \sin \varphi_B$$

$$Q_C = U_C I_C \sin \varphi_C$$

Реактивная  
мощность  
цепи

$$Q = \pm Q_{AB} \pm Q_{BC} \pm Q_{CA}$$

$$Q_{AB} = U_{AB} I_{AB} \sin \varphi_{AB}$$

$$Q_{BC} = U_{BC} I_{BC} \sin \varphi_{BC}$$

$$Q_{CA} = U_{CA} I_{CA} \sin \varphi_{CA}$$

Полная мощность трехфазной цепи

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Полная мощность цепи при несимметричной нагрузке — сумма комплексных мощностей фаз

Для звезды:  $\underline{S} = \underline{S}_A + \underline{S}_B + \underline{S}_C$

Для треугольника:  $\underline{S} = \underline{S}_{AB} + \underline{S}_{BC} + \underline{S}_{CA}$

Мощности цепи при симметричной нагрузке

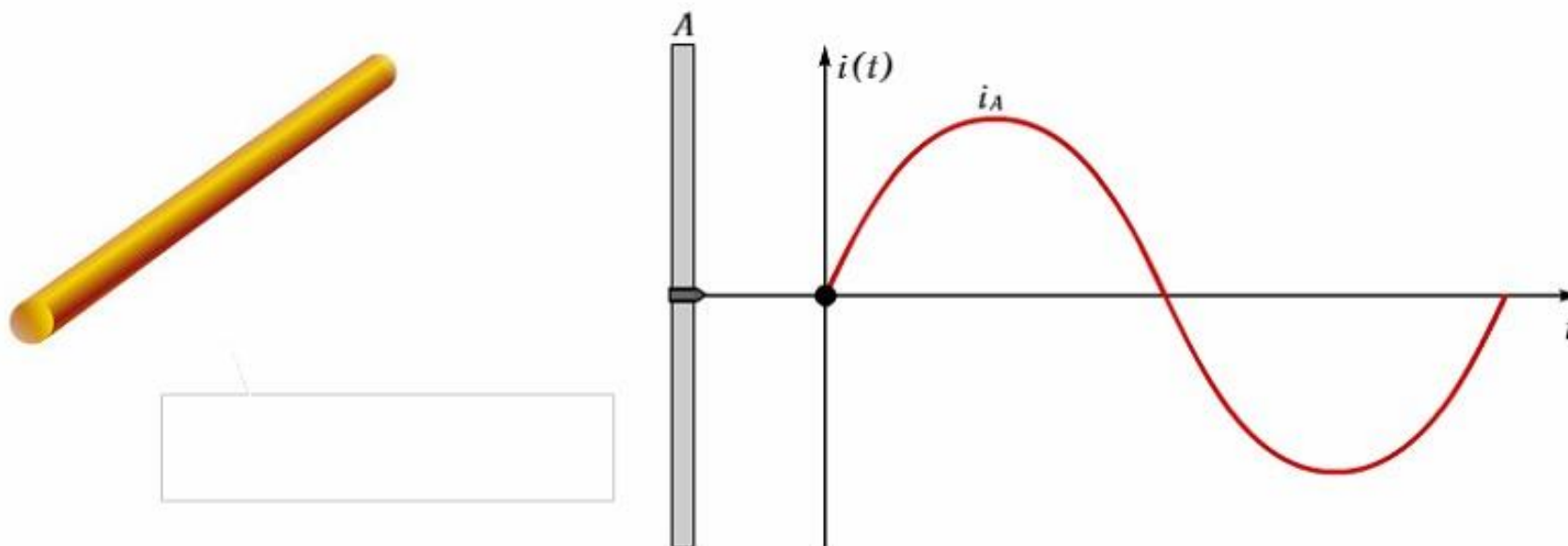
$$P = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi_{\Phi} = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi_L$$

$$Q = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi_{\Phi} = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_L$$

$$S = 3U_{\Phi} I_{\Phi} = \sqrt{3} U_L I_L$$

## Вращающееся магнитное поле трёхфазной системы

Магнитное поле проводника с током



При протекании тока по проводу  
вокруг него возникает магнитное поле.  
Изменение тока  
вызывает изменение магнитного поля.

Проводник с током

Рамка с током

Трёхфазный двигатель

## Вращающееся магнитное поле двухфазного тока

Двухфазным током называется совокупность двух однофазных токов, сдвинутых по фазе на угол  $90^\circ$  друг относительно друга:

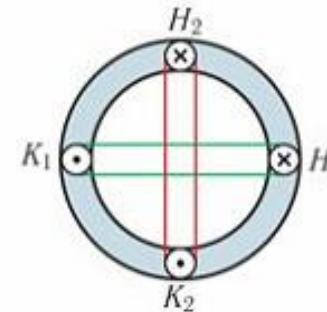
$$i_1 = I_m \sin \omega t$$

$$i_2 = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

Эти токи создают в обмотке магнитные потоки, сдвинутые по фазе так же на угол  $90^\circ$ :

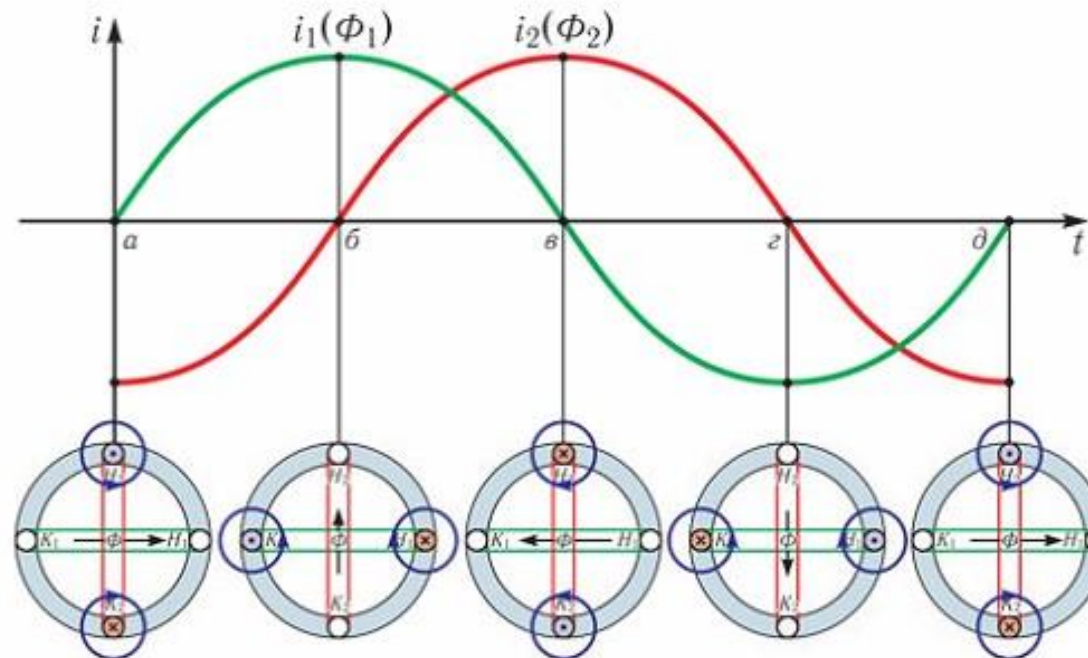
$$\phi_1 = \Phi_m \sin \omega t$$

$$\phi_2 = \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$



Таким образом, если по двум неподвижно скрепленным под углом  $90^\circ$  обмоткам пропустить двухфазный ток, то внутри этих обмоток создается вращающееся магнитное поле двухфазного тока.

Вращающееся магнитное поле двухфазного тока широко применяется для пуска и работы однофазных машин переменного тока.





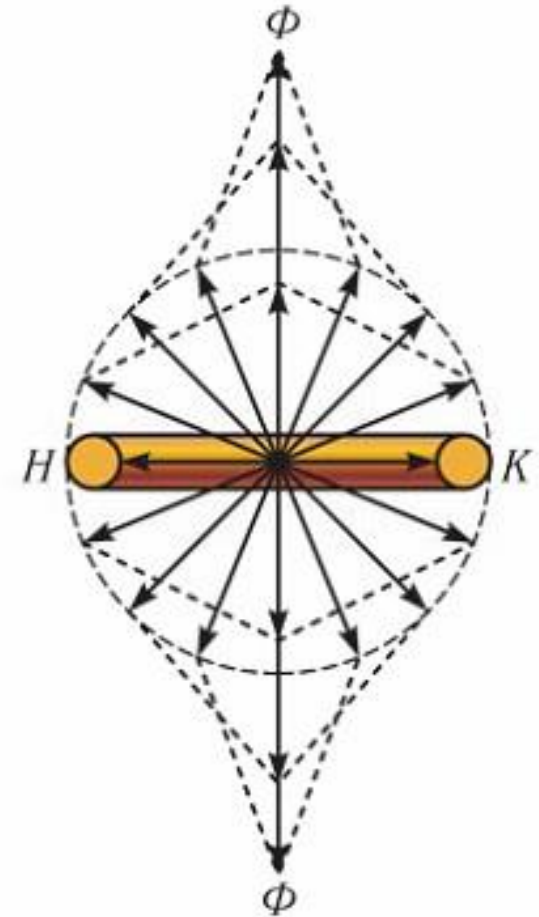
## Пульсирующее магнитное поле

Если по неподвижной обмотке пропустить синусоидальный ток

$$i = I_m \sin \omega t,$$

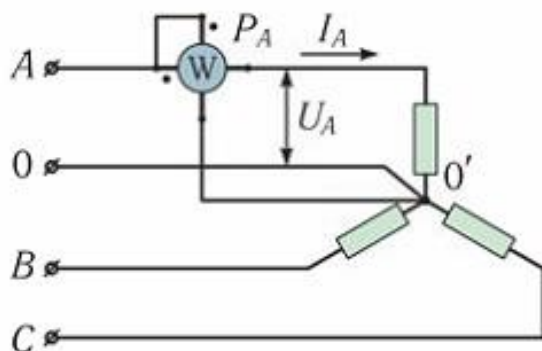
то внутри этой катушки создается пульсирующее магнитное поле, то есть поле, изменяющееся по величине и направлению, но расположенное в одной плоскости.

Пульсирующее магнитное поле можно рассматривать как два магнитных поля, вращающихся в разные стороны. Поэтому в машинах, в которых используется пульсирующее магнитное поле, отсутствует пусковой момент. Для работы таких машин его необходимо создать. Пусковой момент в них создают механически, или за счет пусковой обмотки.

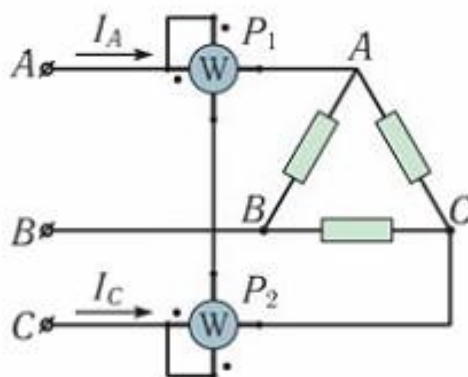


## Измерение мощности и энергии в трехфазной цепи

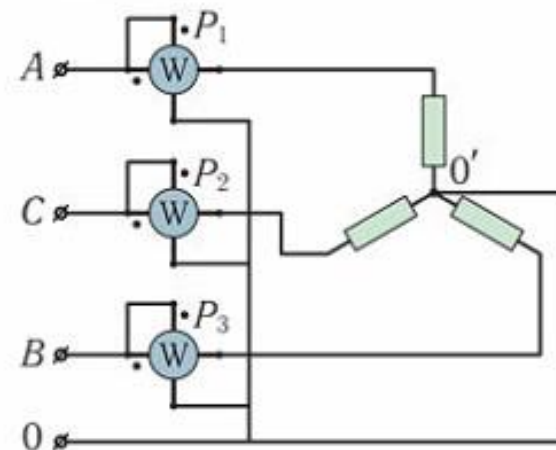
При симметричной нагрузке  
в цепи с доступной  
нейтральной точкой



В трехпроводной трехфазной  
цепи при любой нагрузке



В четырехпроводной цепи  
при несимметричной нагрузке



Показания ваттметров

$$P_A = U_A I_A \cos \varphi_A$$

$$P_1 = U_{AB} I_A \cos(\angle U_{AB} I_C)$$

$$P_2 = U_{BC} I_C \cos(\angle U_{BC} I_C)$$

$$P_1 = P_A$$

$$P_2 = P_B$$

$$P_3 = P_C$$

Активная мощность цепи

$$P = 3 \cdot P_A$$

Алгебраическая сумма  
показаний ваттметров:

$$P = P_1 + P_2$$

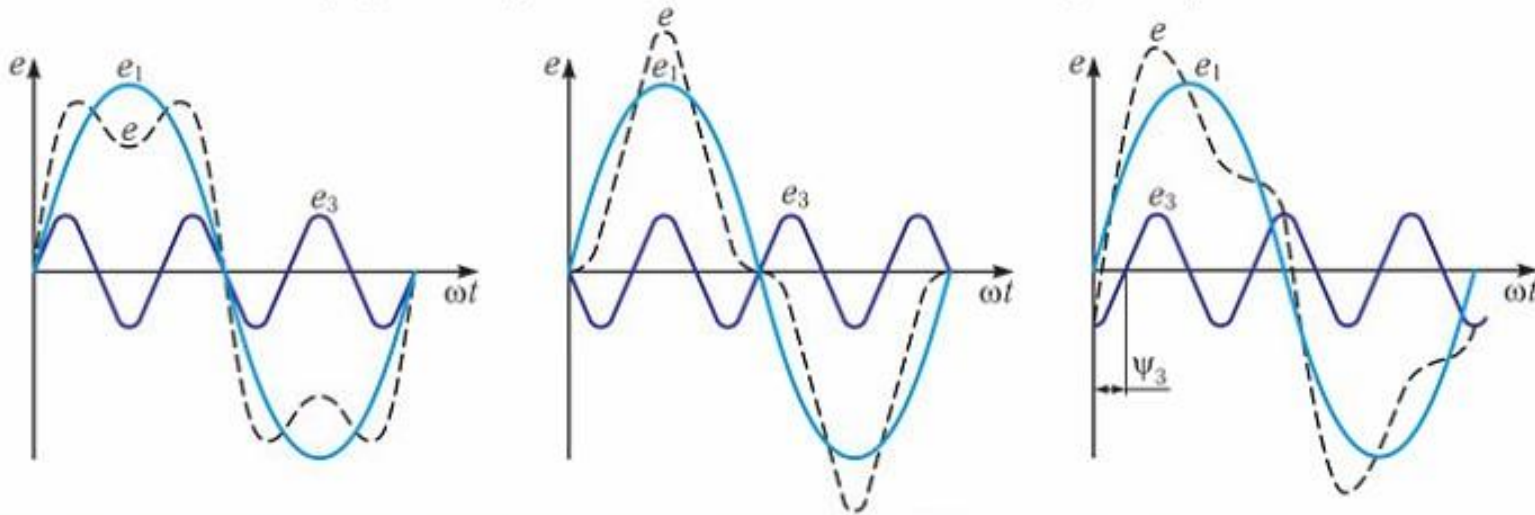
$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

## Теорема Фурье

Любая периодически изменяющаяся величина может быть представлена в виде суммы постоянной составляющей и ряда синусоидальных составляющих с кратными частотами.

Синусоидальные составляющие несинусоидальных колебаний называются гармониками.

Все несинусоидальные периодические колебания раскладываются в полный ряд Фурье (в данном случае складываются только 1-я и 3-я гармоники).



Гармоники можно преобразовать, применив из тригонометрии формулу синуса суммы двух углов.

$k$ -ю гармонику можно представить в виде:

$$A_k \sin(k\omega t + \psi_k) = A_k \sin k\omega t \cdot \cos \psi_k = A_k \cos k\omega t \cdot \sin \psi_k$$

Постоянные величины

$$A_k \cos \psi_k = B_k \quad A_k \sin \psi_k = C_k$$

$$A_k \sin(k\omega t + \psi_k) = B_k \sin k\omega t + C_k \cos k\omega t$$

Ряд Фурье

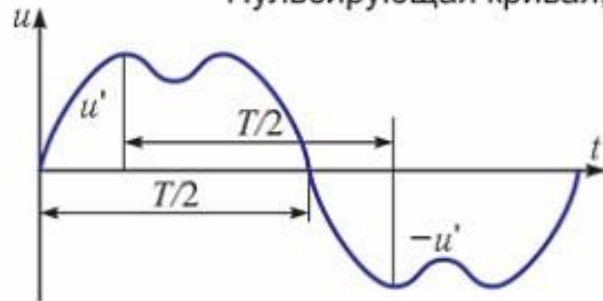
$$f(\omega t) = A_0 + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + \dots + B_k \sin k\omega t + \\ + C_1 \cos \omega t + C_2 \cos 2\omega t + C_3 \cos 3\omega t + \dots + C_k \cos k\omega t$$



## Свойства периодических кривых

Если у несинусоидальной периодической кривой среднее за период значение (ордината) равно нулю, то постоянная составляющая такой кривой также равна нулю. Среднее значение периодической кривой, состоящей из постоянной составляющей и ряда гармоник, равно постоянной составляющей.

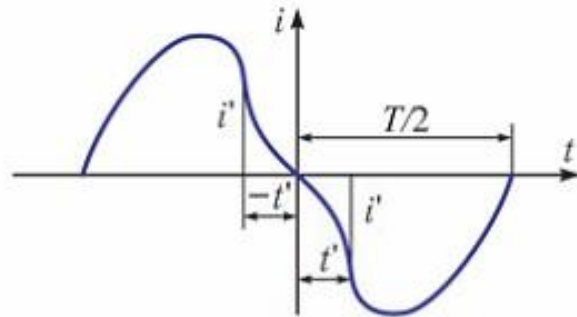
Пульсирующая кривая, **симметричная относительно оси абсцисс**



Такая кривая содержит только **нечетные гармоники**:

$$f(\omega t) = A_1 \sin(\omega t + \Psi_1) + A_3 \sin(3\omega t + \Psi_3) \\ = A_5 \sin(5\omega t + \Psi_5) + \dots$$

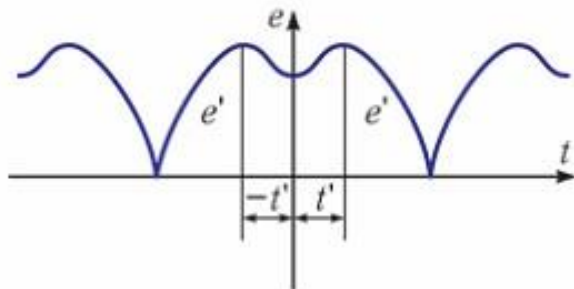
Пульсирующая кривая, **симметричная относительно начала координат**



Такая кривая содержит только **синусоиды**:

$$f(\omega t) = B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + B_3 \sin 3\omega t + \\ B_k \sin k\omega t + \dots$$

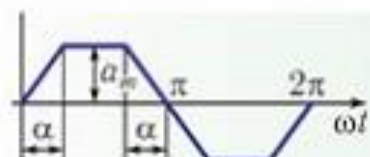
Пульсирующая кривая, **симметричная относительно оси ординат**



Такая кривая содержит **постоянную составляющую и косинусоиды**:

$$f(\omega t) = A_0 + C_1 \cos \omega t + C_2 \cos 2\omega t \\ + C_3 \cos 3\omega t + \dots$$

## Таблица несинусоидальных кривых правильной формы



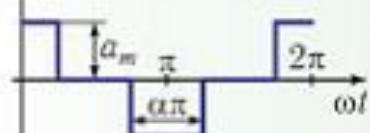
$$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\alpha\pi} (\sin\alpha \sin\omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \sin 5\omega t + \dots)$$



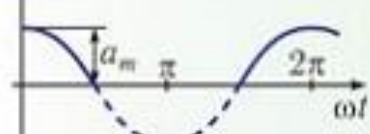
$$f(\omega t) = \frac{8a_m}{\pi^2} (\sin\omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t - \frac{1}{49} \sin 7\omega t + \dots)$$



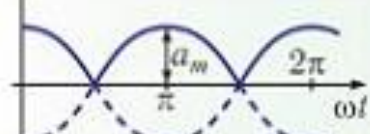
$$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} (\sin\omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots)$$



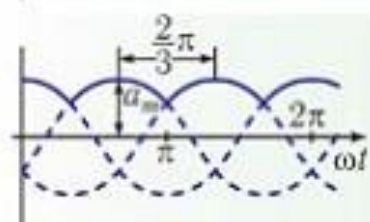
$$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} (\sin \frac{\alpha\pi}{2} \cos\omega t + \frac{1}{3} \sin \frac{3\alpha\pi}{2} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \sin \frac{5\alpha\pi}{2} \cos 5\omega t + \dots)$$



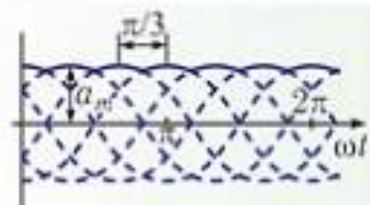
$$f(\omega t) = \frac{2a_m}{\pi} (\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos\omega t + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 6\omega t - \dots)$$



$$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} (\frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots)$$



$$f(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}a_m}{\pi} (\frac{1}{2} + \frac{1}{2 \cdot 4} \cos 3\omega t - \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t + \frac{1}{8 \cdot 10} \cos 9\omega t - \dots)$$



$$f(\omega t) = \frac{3a_m}{\pi} (1 + \frac{2\cos 6\omega t}{5 \cdot 7} - \frac{2\cos 12\omega t}{11 \cdot 13} + \frac{2\cos 18\omega t}{17 \cdot 19} - \dots)$$



## Параметры несинусоидального тока в линейных электрических цепях

**Индуктивное сопротивление** с увеличением номера гармоники увеличивается, так как увеличивается частота  $\omega$ , и для любой гармоники может быть определено выражением:

$$X_{Lk} = k\omega L = k\omega L_{L1}$$

$k$  — номер гармоники;  
 $L_{L1}$  — индуктивное сопротивление первой гармоники

**Емкостное сопротивление** с увеличением номера гармоник уменьшается и для любой гармоники определяется выражением:

$$X_{Ck} = \frac{1}{k\omega L} = \frac{X_{C1}}{k}$$

$k$  — номер гармоники;  
 $X_{C1}$  — емкостное сопротивление первой гармоники

**Полное сопротивление** неразветвлённой линейной цепи для любой гармоники:

$$Z_k = \sqrt{R^2 + (X_{Lk} + X_{Ck})^2}$$

**Угол сдвига фаз между током и напряжением** для любой гармоники:

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R} = \arctg \frac{X_{Lk} - X_{Ck}}{R}$$

**Амплитуды токов** для каждой гармоники равны:

$$I_{mk} = \frac{U_{mk}}{Z_{mk}}$$

Данные выражения используются для расчёта всех параметров цепи

### Действующие значения несинусоидальных величин

Действующим называют значение несинусоидального тока, эквивалентное постоянному току по тепловому действию

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}$$

Где  $I_0$  — постоянная составляющая несинусоидального тока;  
 $I_1, I_2, I_3$  — действующие значения токов гармоник

Действующее значение несинусоидального тока является средней квадратичной величиной постоянной составляющей и действующих значений токов гармоник

**Действующее значение несинусоидального тока** можно определить по формуле:

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{m1}^2}{2} + \frac{I_{m2}^2}{2} + \frac{I_{m3}^2}{2} + \dots + \frac{I_{mk}^2}{2}}$$

**Действующее значение несинусоидального напряжения** определяется выражением:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_k^2}$$

Действующее значение несинусоидального напряжения является средней квадратичной величиной постоянной составляющей и действующих значений напряжений гармоник

**Коэффициенты искажения тока и напряжения:**

$$K_{ui} = \frac{I_1}{\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}}$$

$$K_{un} = \frac{U_1}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2}}$$

Коэффициент гармоники показывает удельный вес высших гармоник  $K_r$  относительно первой (основной) гармоники:

$$K_r = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_k^2}}{I_1}$$

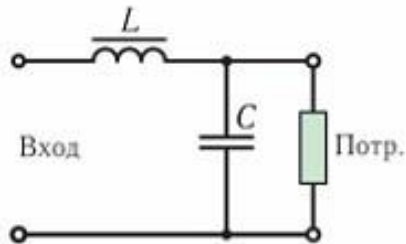


## Электрические фильтры

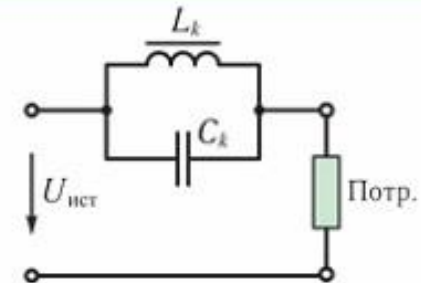
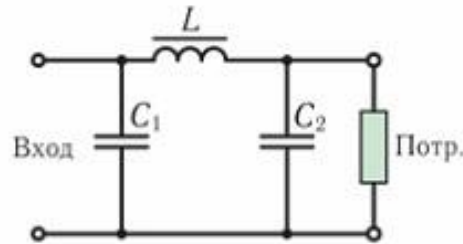
Для того чтобы, отфильтровать высшие гармоники несинусоидального напряжения, то есть не пропустить их к потребителю, последовательно с потребителем **включается индуктивность**, а параллельно — **емкость**

При этом, чем выше номер гармоники, тем большим сопротивлением обладает индуктивность и тем большее напряжение этой гармоники падает на индуктивном сопротивлении и тем меньше напряжение поступает на нагрузку

Г-образный фильтр



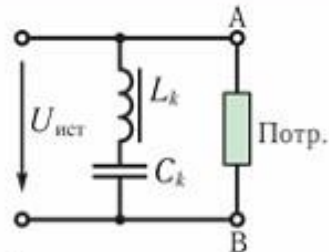
П-образный фильтр



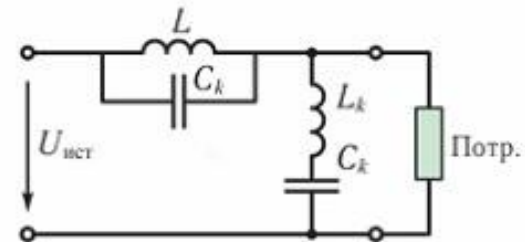
Если нужно отфильтровать постоянную составляющую несинусоидального напряжения или его низкие частоты (гармоники), то в фильтре **меняют местами индуктивность и емкость**

Если в напряжении, поступающем на вход фильтра, имеется  $k$ -я гармоника, которую нужно отфильтровать, то последовательно с потребителем можно включить параллельный резонансный контур, настроенный в резонанс токов на частоту этой  $k$ -й гармоники

Такого же эффекта можно добиться, если параллельно с потребителем включить последовательный резонансный контур, настроенный в резонанс напряжений на частоту  $k$ -й гармоники



Фильтры, в которых резонансные контуры меняют местами — **полосовые**



Одновременное включение обоих контуров обеспечивает значительно лучшую фильтрацию

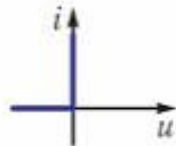
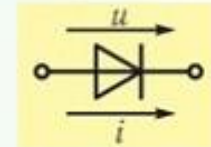
# Выпрямители

**Выпрямители** — аппараты, преобразующие переменный ток в постоянный.

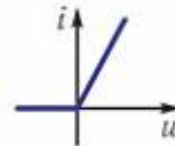
Основным элементом выпрямителя является электрический вентиль

Электрический вентиль обладает малым сопротивлением в прямом направлении и большим в обратном направлении.

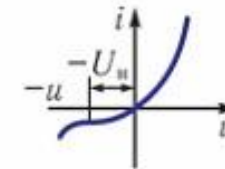
Вентиль имеет нелинейную ВАХ, поскольку обладает практически односторонней проходимостью



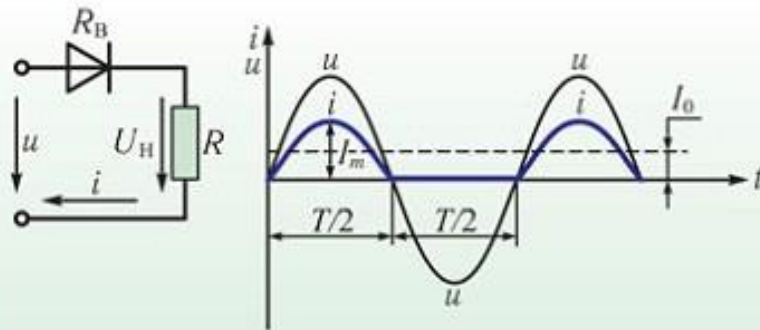
Вентиль, сопротивление которого в прямом направлении равно нулю, а в обратном — бесконечно большое, считается **идеальным вентилем**



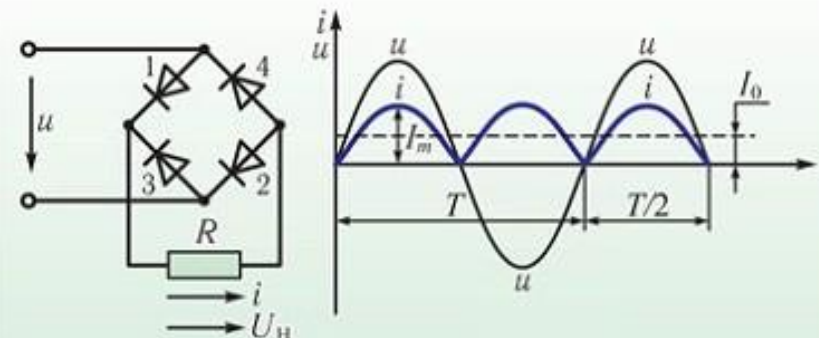
ВАХ вентиля, сопротивлением которого в прямом направлении пренебречь нельзя, а обратным током можно пренебречь



Вольт-амперная характеристика реального полупроводникового вентиля



В схеме однополупериодного выпрямителя вентиль включается последовательно с потребителем  $R$ , ток которого необходимо выпрямить. При таком включении создается **однополупериодное выпрямление тока**

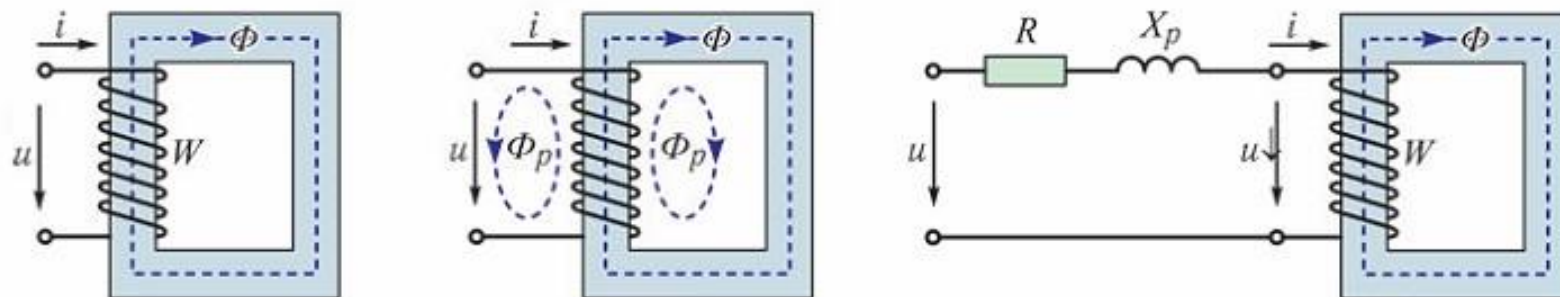


Если вентили включены по мостовой схеме и к мосту подведено синусоидальное напряжение, то по сопротивлению потребителя  $R$  проходит несинусоидальный пульсирующий ток, полученный в результате **двухполупериодного выпрямления**

## Катушка с ферромагнитным сердечником

Наиболее распространённым нелинейным элементом переменного тока в электрических машинах, трансформаторах и других аппаратах является катушка со стальным сердечником

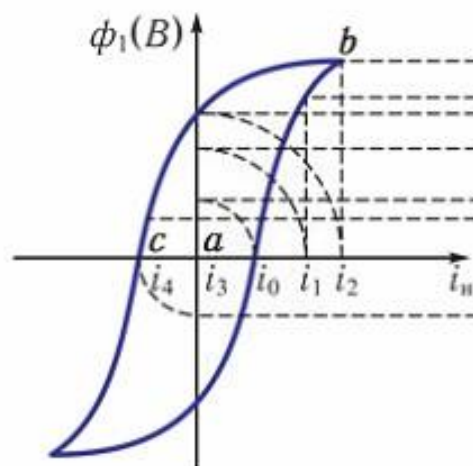
$$U = 4,44fW\Phi_m$$



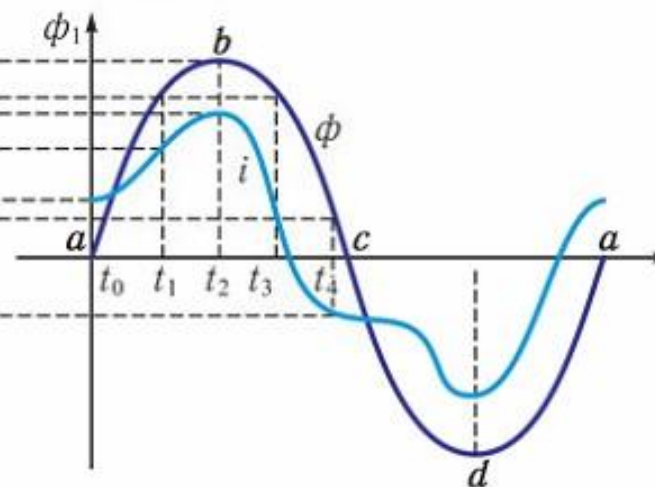
Если к катушке со стальным сердечником приложено синусоидальное напряжение, то в сердечнике возникает синусоидальный магнитный поток. Ток в катушке при этом оказывается несинусоидальным. Это связано с нелинейной зависимостью между магнитным потоком и током

$$\phi = f(i)$$

Петля гистерезиса



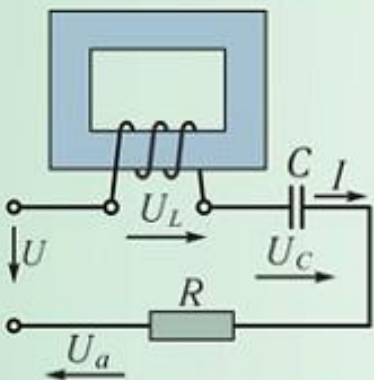
Несинусоидальная кривая тока при синусоидальном магнитном потоке





## Феррорезонанс

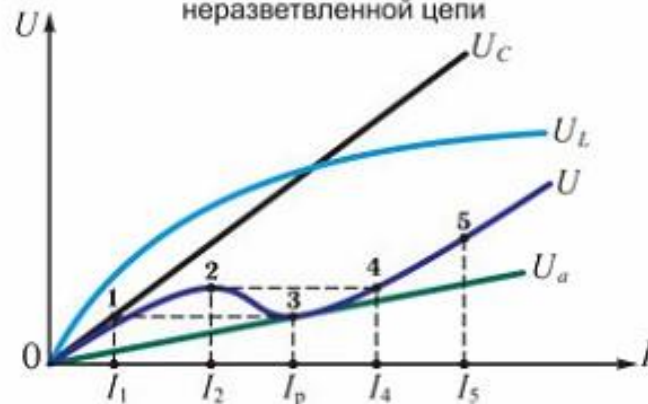
Схема цепи для получения резонанса напряжений



Напряжение источника питания уравнивается суммой всех падений напряжений:

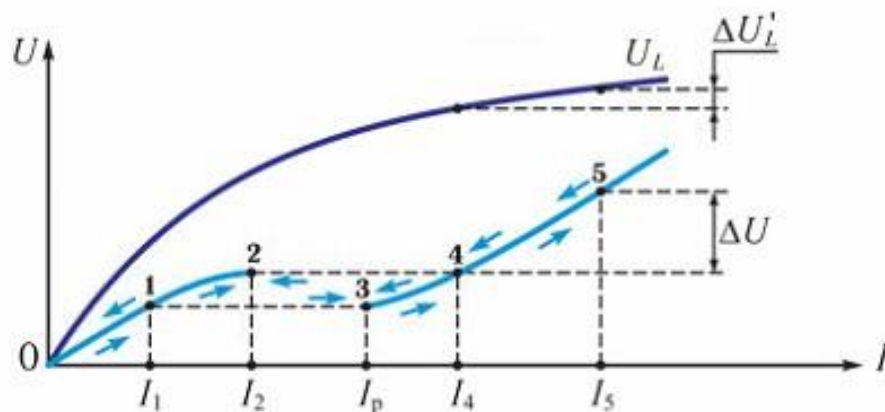
$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

Вольт-амперная характеристика неразветвленной цепи



При  $U_L = U_C$  общее напряжение цепи равно  $U_a$ .  
 $U = U_a$  — наступает феррорезонанс напряжений.

### Явление «опрокидывания фазы»



На участке 2–4 цепь работает не устойчиво, так как ток изменяется скачкообразно:

- при увеличении напряжения от  $I_2$  до  $I_4$ ;
- при уменьшении напряжения от  $I_p$  до  $I_1$

После скачка тока напряжение на катушке  $U_L$  не зависит от общего напряжения цепи ( $\Delta U_L' \ll \Delta U$ ), благодаря магнитному насыщению сердечника.

Феррорезонанс используется в ферромагнитных стабилизаторах напряжения. Приемники энергии в них подключаются параллельно катушке.

## Переходные процессы в электрических цепях. Законы коммутации

**Переходный процесс** — электромагнитный процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося (принужденного) режима к другому

**Установившийся режим** — это режим, при котором напряжения и токи в течение длительного времени остаются постоянными. Такой режим работы цепи называется **принужденным режимом**

### Переходные процессы в цепях с индуктивностью

#### Первый закон коммутации:

Ток в индуктивности не может изменяться скачком.

За счет ЭДС самоиндукции при подключении катушки индуктивности к источнику с постоянным напряжением

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

ток в цепи нарастает постепенно от нуля до принужденного (установившегося) значения:

$$I_{\text{пр}} = I = \frac{U}{R}$$

Свободный ток изменяется в этой цепи по закону:

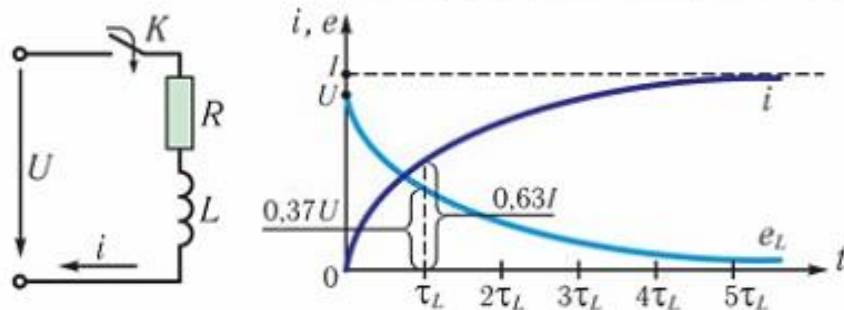
$$I_{\text{св}} = -I e^{-t/\tau}$$

Постоянная времени  $\tau$  измеряется в секундах и для цепи с индуктивностью:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Ток переходного процесса в любой момент времени  $t$  при подключении реальной катушки индуктивности к источнику можно определить:

$$i = i_{\text{св}} + i_{\text{пр}} = I + (-I e^{-t/\tau}), \text{ то есть } i = I(1 - e^{-t/\tau})$$

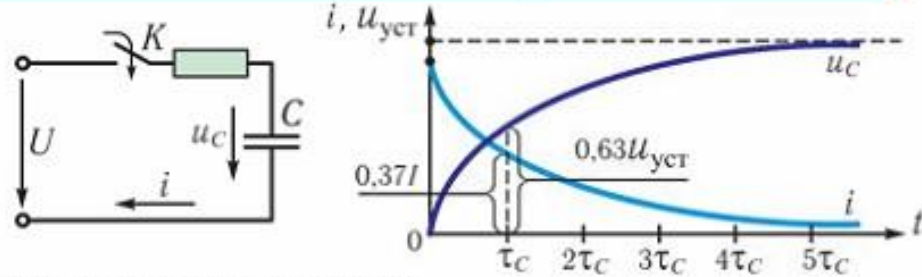


Переходный процесс теоретически длится бесконечно долго, однако его можно считать законченным, когда ток  $i$  достигнет 99% установившегося тока. Это произойдет за время  $t = 4,6\tau$ . Постоянная времени  $\tau$  характеризует длительность переходного процесса, то есть чем больше  $\tau$ , тем медленней проходит процесс

## Переходные процессы в цепях с емкостью

Если к источнику с постоянным напряжением  $U$  через резистор с сопротивлением  $R$  подключить конденсатор емкостью  $C$ , то он будет заряжаться и напряжение  $u_c$  на конденсаторе будет увеличиваться от нуля до установившегося значения  $u_{уст}$

**Второй закон коммутации:**  
Напряжение на емкости не может изменяться скачком



В течение переходного процесса напряжение на конденсаторе складывается из напряжения принужденного режима  $u_{пр}$ , и напряжения свободного режима  $u_{св}$ :

$$u_c = u_{пр} + u_{св}$$

Напряжение принужденного режима равно установившемуся  $u_{пр} = u_{уст}$ , а напряжение свободного процесса:

$$u_{св} = -Ue^{-t/\tau}$$

Для переходного процесса в цепи с конденсатором:

$$\tau = RC$$

Тогда напряжение на конденсаторе в любой момент времени  $t$  при заряде конденсатора через резистор определяется:

$$u_c = u_{пр} + u_{св} = U + (-Ue^{-t/\tau}), \text{ то есть } u_c = U(1 - e^{-t/\tau})$$

Ток при зарядке конденсатора:

$$i = Ie^{-t/\tau}$$

За время  $t = \tau$  ток уменьшается до 37% максимального тока

Процесс разряда конденсатора через свой диэлектрик называется **саморазрядом**

Постоянная времени саморазряда зависит от физических свойств диэлектрика:

$$\tau = \rho \epsilon_0 \epsilon_r$$

Где  $\rho$  — удельное сопротивление диэлектрика;  
 $\epsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  
 $\epsilon_0$  — электрическая постоянная