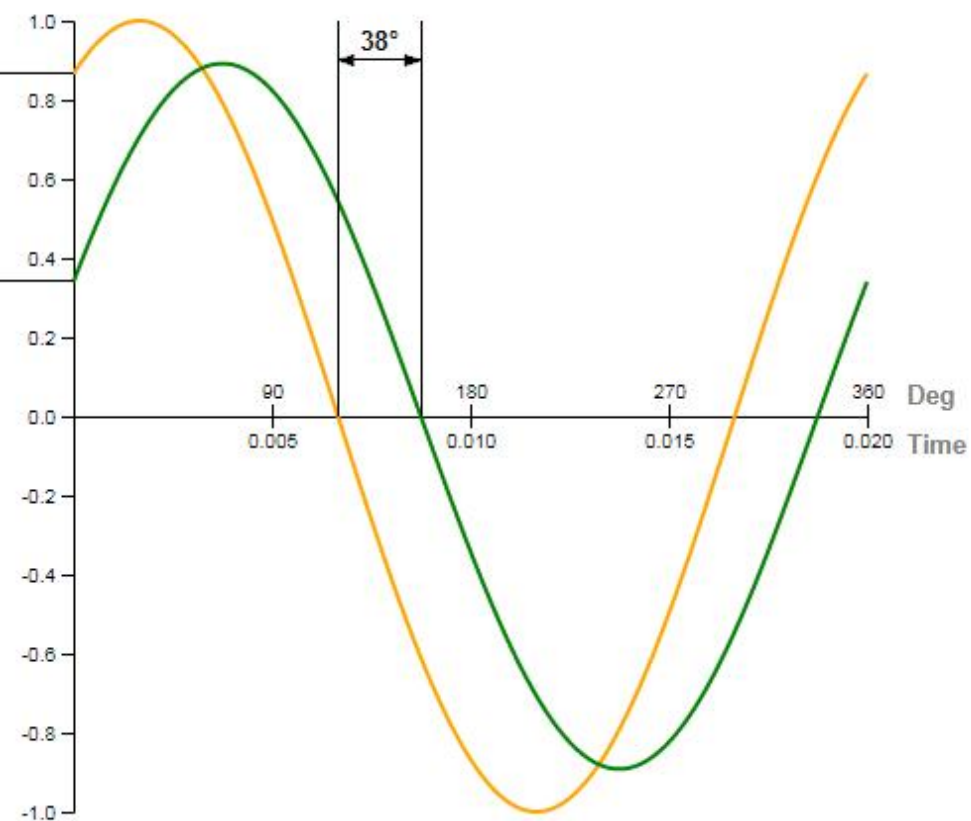
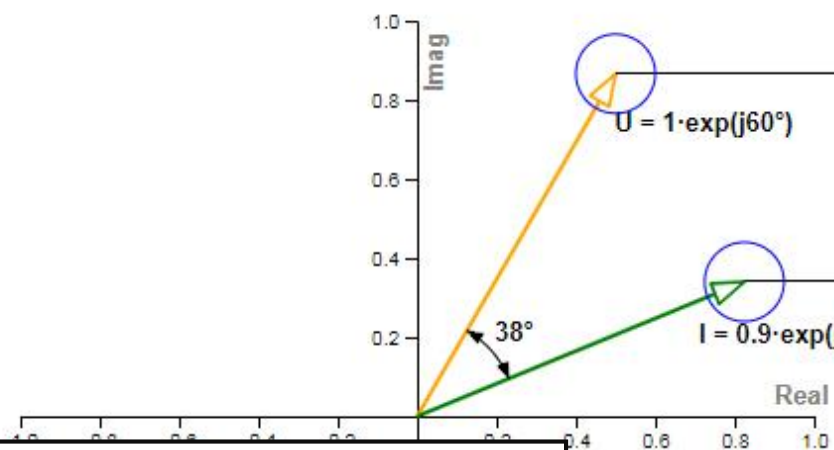


Релейная защита и автоматика систем электрообеспечения

Лекция №__

Векторные диаграммы.

Составил: Кузнецов Д. Б.



Компания ЭНЕРГОМАШВИН

В.Г. Гловацкий, И.В. Пономарев

СОВРЕМЕННЫЕ СРЕДСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
И АВТОМАТИКИ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ

3 электронная версия

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В большинстве электрических сетей применяется переменный ток, в связи с его существенными преимуществами перед постоянным. К ним можно отнести:

- Отсутствие необходимости его выпрямления, так как генераторы вырабатывают переменный ток, и для его выпрямления требуются механический (коллектор) или диодный выпрямитель.
- Легкость преобразования уровня напряжения с помощью трансформаторов. Это дает возможность использовать для передачи электроэнергии высокие напряжения, при которых потери на ее транспорт меньше, а в местах использования - низкое напряжение, на котором токоприемники становятся проще и дешевле.

Такая электрическая сеть выглядит следующим образом:

Генератор напряжением 3-24 кВ в зависимости от мощности, повышающий трансформатор и линия электропередачи напряжением до 750 кВ, в зависимости от передаваемой мощности. На приемном конце - трансформатор, понижающий напряжение до величины, удобной для электроприемников: 10-0.4 кВ.

Зачастую перед потреблением происходит несколько ступеней трансформации напряжения - появляются промежуточные трансформаторные подстанции. Электрические сети могут быть однофазные и трехфазные. Однофазные сети состоят из прямого и обратного провода, т.е. для передачи электроэнергии требуется обязательно 2 провода. Трехфазная сеть состоит из трех проводов и таким образом обратный

провод отсутствует. Так как в трехфазной симметричной сети сумма токов трех фаз равна нулю, исчезает необходимость в обратной проводе. Если же трехфазная сеть используется для питания однофазных электроприемников, то нагрузка по фазам может быть неодинакова, и появляется необходимость в обратном проводе, в котором протекает разность токов трех фаз. В трехфазном четырехпроводном исполнении выполнены сети 0.4 кВ бытового назначения.

Уровни напряжения стандартизованы и величина их в России и странах СНГ соответствует следующей шкале:

220 В, 0.4; 1; 2; 3; 6; 10; 15; 20; 25; 35; 110; 154; 220; 330; 400; 500; 750; 1150 кВ.

При этом подразумевается величина напряжения между фазами - **линейное напряжение**. Реальная величина напряжения электрических аппаратов может отличаться от этой шкалы на 5% и более - поэтому значения напряжения шкалы называются классом напряжения. Трехфазные сети имеют четвертую точку, которая может существовать физически или условно. Эта точка называется нейтралью. Напряжение в этой точке равно геометрической сумме напряжений трех фаз, а напряжение фазы равно напряжению между фазным проводом и этой нейтральной точкой. Трехфазные аппараты могут иметь обмотки, соединенные между собой в звезду - концы всех обмоток соединяются в одну точку - это нейтраль - физически существующая нулевая точка. Если обмотки соединяются в треугольник - каждая обмотка подключается к обмоткам 2-х фаз - такая точка физически отсутствует, однако она существует - это

земля, относительно которой и измеряются фазные напряжения. Напряжение между 2-мя фазами называется линейным (междуфазным напряжением), напряжение между фазой и землей - фазным.

По режиму нейтрали, сети разделяются на сети с изолированной и заземленной нейтралью.

К сетям с изолированной нейтралью относятся сети напряжением 220 В и 1-35 кВ. В этих сетях нулевая точка изолирована от земли, или соединена с землей через большое сопротивление дугогасящего реактора, или через активное сопротивление 500 -100 Ом. *Дугогасящий реактор компенсирует емкостной ток замыкания на землю, и через место замыкания, при резонансной настройке реактора, емкостной ток не протекает, а протекает только относительно малый активный ток утечки.* За рубежом широко применяется, и начинает применяться у нас заземление нейтрали через резистор. При этом уменьшаются перенапряжения в сети при замыканиях на землю, и обеспечивается ток, достаточный для четкой работы защиты от замыкания на землю.

К сетям с заземленной нейтралью относятся сети 0,4 кВ и сети 110 -1150 кВ. В сетях с заземленной нейтралью, нейтраль обмотки трансформатора соединенной в звезду присоединяется к заземляющему контуру непосредственно, или через малое сопротивление. Сети напряжением 110-220 кВ называются также сетями с эффективно заземленной нейтралью. В таких сетях нейтраль части трансформаторов остается разземленной. Это снизит величину тока короткого замыкания и улучшает работу релейной защиты. Однако при этом требуется следить, чтобы ни в одном из возможных режимов не выделялся

участок сети, где нейтраль всех трансформаторов изолированы.

ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Понятие о векторах. На рис. 1.1 приведена кривая изменения переменного тока во времени. Ток сначала растёт от нуля (при $\phi = 0^\circ$) до максимального положительного значения $+I_{max}$ (при $\phi = 90^\circ$), затем убывает, переходит через нуль (при $\phi = 180^\circ$), достигает максимального отрицательного значения $-I_{max}$ (при $\phi = 270^\circ$) и, наконец, возвращается к нулю (при $\phi = 360^\circ$). После этого цикл изменения тока повторяется.

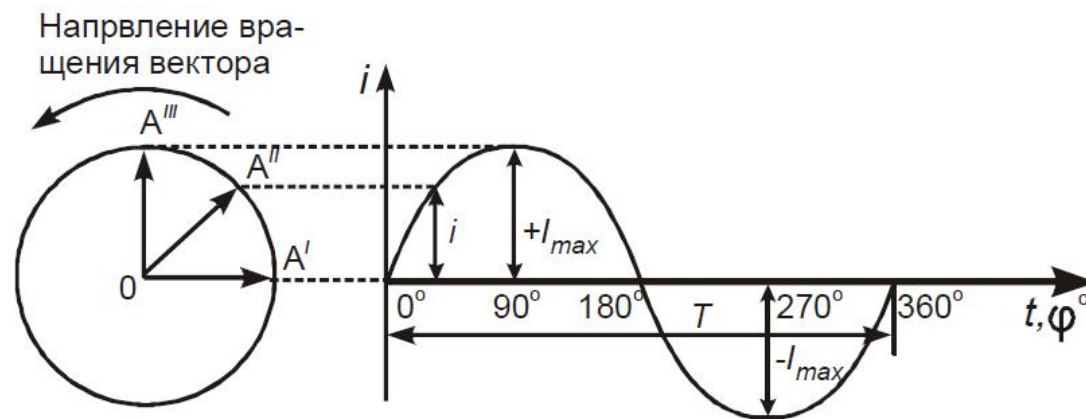


Рис. 1.1. Кривая изменения переменного тока во времени.

Кривая изменения переменного тока во времени, приведенная на рис. 1.1, называется синусоидой.

Время T , в течение которого происходит полный цикл изменения тока, соответствующий изменению угла на 360° , называется периодом переменного тока. Число периодов за 1 с называется частотой переменного тока. В промышленных установках и в быту в странах Европы используется главным образом переменный ток частотой 50 Гц. Этот ток 50 раз в секунду принимает положительное и отрицательное направление. Изменение переменного тока во времени можно записать в следующем виде:

$$i = I_{max} \cdot \sin(\omega t + \alpha)$$

где:

i – мгновенное значение тока, т. е. значение тока в каждый момент времени;

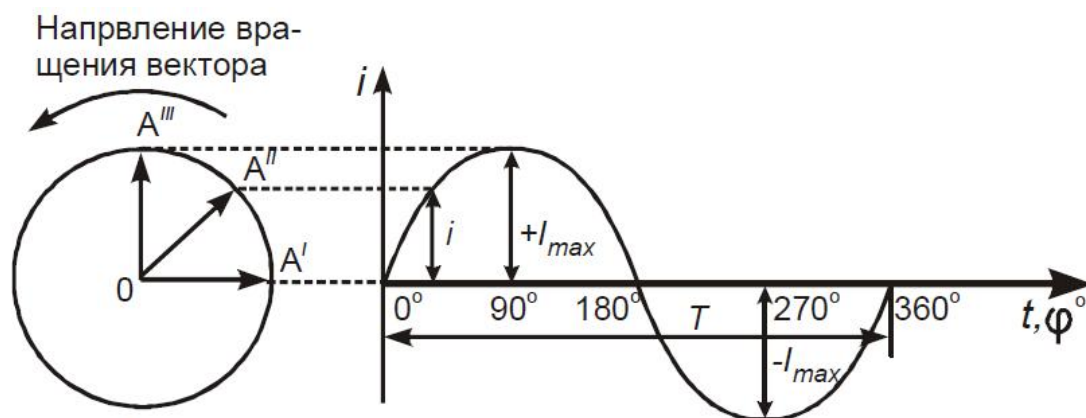
I_{max} – максимальное значение тока;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока, $f = 50$ Гц, $\omega = 2\pi \cdot 50 = 314$;

α – начальный угол, соответствующий моменту времени, с которого начинается отсчет времени (при $t = 0$).

Анализируя действие устройств релейной защиты и автоматики, необходимо сопоставлять токи и напряжения, складывать или вычитать их, определять углы между ними и производить другие операции. Пользоваться при этом кривыми, подобными приведенной на рис. 1,1, неудобно, поскольку построение синусоид тока и напряжения занимает много времени и не дает простого и наглядного результата.

Поэтому для упрощения принято изображать токи и напряжения в виде отрезков прямых линий, имеющих определенную длину и направление, — так называемых векторов (OA на рис. 1.1). Один конец вектора закреплен в точке O — начало координат, а второй вращается против часовой стрелки.



Мгновенное значение тока или напряжения в каждый момент

Рис. 1.1. Кривая изменения переменного тока во времени. времени определяется проекцией на вертикальную ось вектора, длина которого равна максимальному значению тока или напряжения. Эта проекция будет становиться то положительной, то отрицательной, принимая максимальные значения при вертикальном расположении вектора. За время T , равное периоду переменного тока, вектор совершит полный оборот по окружности (360°), занимая последовательно положения OA' , OA'' , OA''' и т. д. При частоте переменного тока 50 Гц вектор будет совершать 50 об/с.

Таким образом, вектор тока или напряжения — это отрезок прямой, равный по величине максимальному значению тока или напряжения, вращающийся относительно точки O против движения часовой стрелки

со скоростью, определяемой частотой переменного тока. Зная положение вектора в каждый момент времени, можно определить мгновенное значение тока или напряжения в данный момент.

Так, для положения вектора тока OA , показанного на рис. 1.2, его мгновенное значение определяется

$$OA'' = OA \sin \varphi$$

На основании рис. 1.2 можно также сказать, что *ток в данный момент времени имеет положительное значение*. Однако это еще не дает полного представления о протекании процесса в цепи переменного тока, так как неизвестно, что значит положительный или отрицательный ток, положительное или отрицательное напряжение.

Для того чтобы векторные диаграммы токов и напряжений давали полную картину, их нужно увязать с фактическим протеканием процесса в цепи переменного тока, т. е. *необходимо предварительно принять условные положительные направления токов и напряжений в рассматриваемой схеме*. Без выполнения этого условия, если не заданы положительные направления токов и напряжений, любая векторная диаграмма не имеет никакого смысла.

Рассмотрим простую однофазную цепь переменного тока, приведенную на рис. 1,3, а. От однофазного генератора энергия передается в активное сопротивление нагрузки R . Зададимся положительными

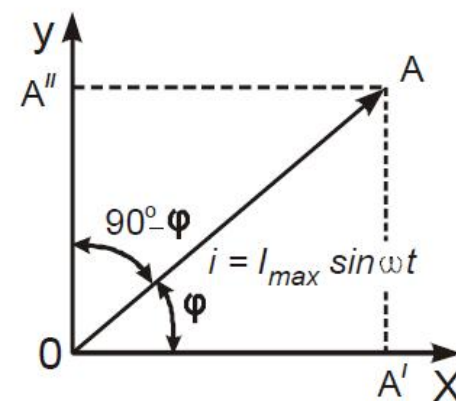


Рис. 1.2 Определение положения вектора на плоскости

направлениями токов и напряжений в рассматриваемой цепи. За условное положительное направление напряжения и ЭДС примем направление, когда потенциал вывода генератора или нагрузки, связанного с линией, выше потенциала вывода, соединенного с землей. В соответствии с правилами, принятыми в электротехнике, положительное направление для ЭДС обозначено стрелкой, направленной в сторону

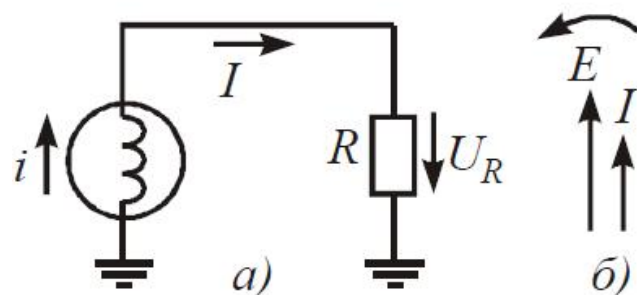


Рис. 1.3 Однофазная цепь переменного тока

более высокого потенциала (от земли к линейному выводу), а - для напряжения - стрелкой, направленной в сторону более низкого потенциала (от линейного вывода к земле).

Переменный ток будем считать положительным, когда во внешней цепи он проходит от шин генератора к нагрузке (обозначено стрелкой). Построим векторы ЭДС и тока, характеризующие работу рассматриваемой, цепи (рис, 1.3, б). Вектор ЭДС произвольно обозначим вертикальной

линией со стрелкой, направленной вверх. Для построения вектора тока запишем для цепи уравнение согласно второму закону Кирхгофа;

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

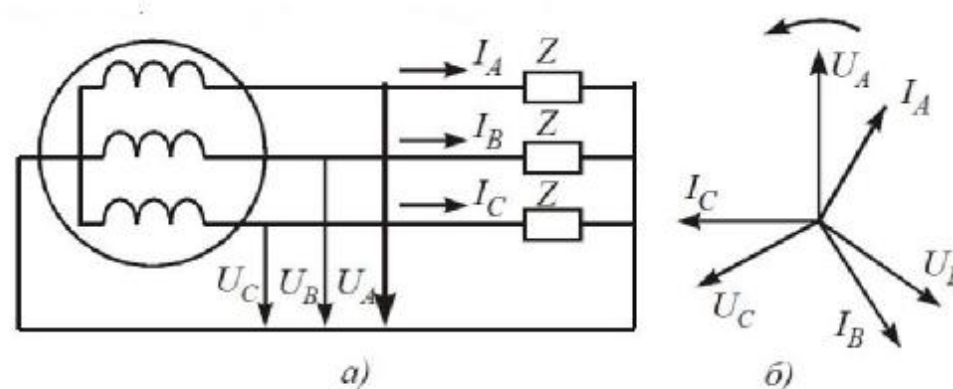
Поскольку знаки векторов тока и ЭДС в выражении (1.2) совпадают, вектор тока будет совпадать с

вектором ЭДС и на рис. 1.3.б. Здесь и в дальнейшем при построении векторов будем откладывать их по величине равными эффективному значению тока и напряжения, что удобно для выполнения различных математических операций с векторами. Как известно, эффективные значения тока и напряжения в $\sqrt{2}$ раз меньше соответствующих максимальных (амплитудных). При заданных положительных направлениях тока и напряжения однозначно определяется и знак мощности. Положительной в рассматриваемом случае будет считаться мощность, направленная от шин генератора в линию:

$$P = EI \cdot \cos \varphi = EI \cdot \cos 0^\circ = EI$$

так как векторы тока и ЭДС на рис. 1.3, б совпадают.

Аналогичные соображения могут быть высказаны и для трехфазной цепи переменного тока, показанной на рис. 1.4, а. В этом случае во всех фазах приняты одинаковые положительные направления, чему соответствует симметричная диаграмма токов и напряжений, приведенная на рис. 1.4, б. Отметим, что *симметричной называется такая трехфазная система векторов, когда все три вектора равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на угол 120° .*

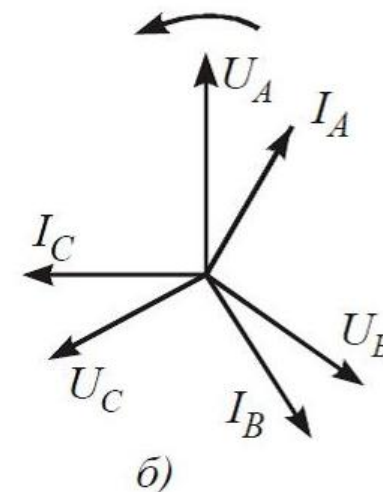


1.4. Трехфазная цепь переменного тока.

Операции с векторами.

Когда мы рассматриваем только одну кривую тока или напряжения, начальное значение угла, с которого начинается отсчет, или, иначе говоря, положение вектора на диаграмме, соответствующее началу времени, может быть принято произвольным. Если же одновременно рассматриваются два или несколько токов и напряжений, то, *задавшись начальным положением на диаграмме одного из векторов, мы тем самым уже определяем положение всех других векторов.*

Все три вектора: фазных напряжений: U_A , U_B , U_C , показанные на рис. 1.4, б, вращаются против часовой стрелки с одинаковой скоростью, определяемой частотой переменного тока. При этом они пересекают вертикальную ось, совпадающую с направлением вектора U_A на рис. 1.4, б, поочередно с определенной последовательностью, а именно U_A , U_B , U_C , которая называется *чередованием фаз напряжения (или тока)*. Для того чтобы определить взаимное расположение двух векторов, обычно говорят, что один из них опережает или отстает от другого. При этом *опережающим считается вектор, который при вращении против часовой стрелки раньше пересечет вертикальную ось*. Так, например, можно сказать, что вектор напряжения U_A на рис. 1.4, б опережает U_B на угол 120° или, с другой стороны, вектор U_C отстает от вектора U_B на угол 120° .



Сложение векторов производится геометрическим суммированием по правилу параллелограмма, как показано на рис. 1.5, а, на котором построена сумма токов ($I_A + I_B$). Так как вычитание — действие, обратное сложению, для определения разности токов (например, $(I_C - I_B)$ достаточно к току I_C прибавить вектор, обратный I_B .

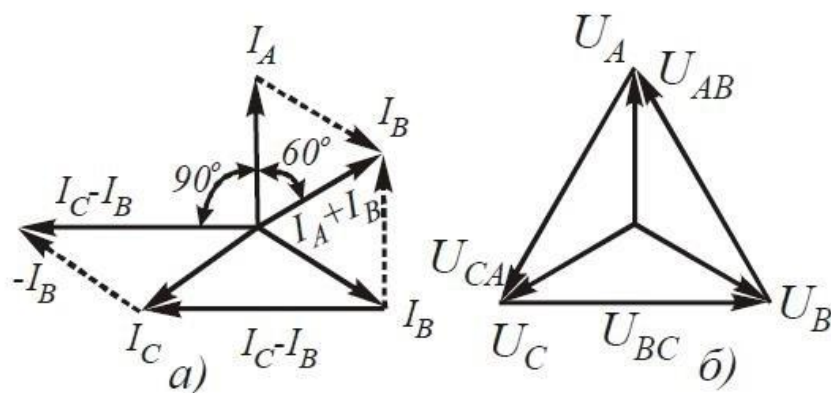


Рис. 1.5. Сложение и вычитание векторов: а) — токов; б) — напряжений.

Очевидно, что положение вектора на плоскости определяется его проекциями на две любые оси. Так, например, для того чтобы определить положение вектора OA (рис. 1.6), достаточно знать его проекции на взаимно перпендикулярные оси.

$$OA' = OA \cdot \cos \varphi$$

$$OA'' = OA \cdot \sin \varphi = OA \cos(90 - \varphi)$$

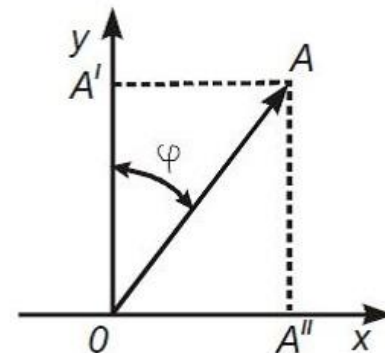


Рис. 1.6. К определению вектора через его проекции на перпендикулярные оси.

Назначение векторных диаграмм

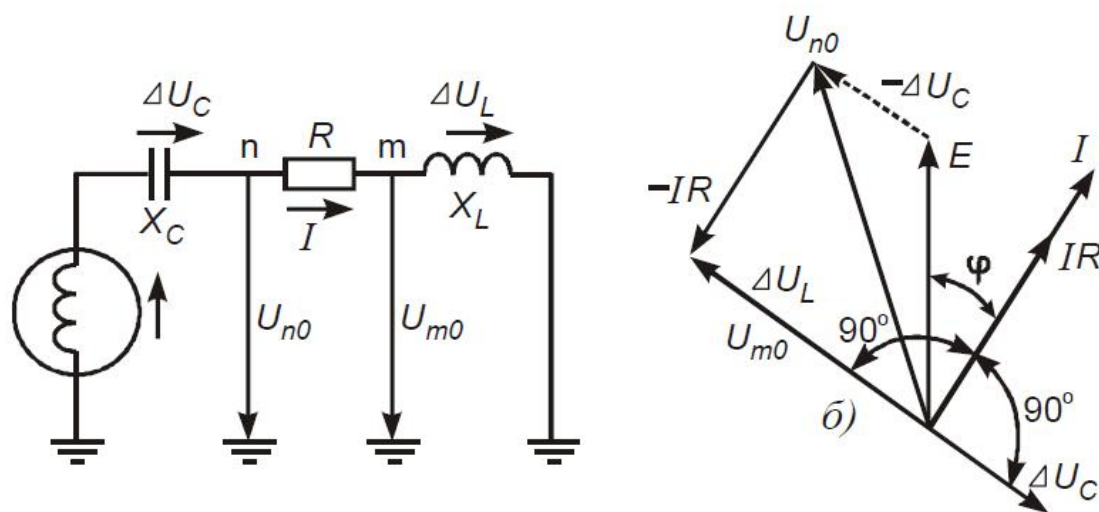
Работникам, занимающимся проектированием и эксплуатацией релейной защиты, часто приходится использовать в своей работе так называемые векторные диаграммы — векторы токов и напряжений, построенные на плоскости в определенном сочетании, соответствующем электрическим процессам, происходящим в рассматриваемой схеме.

По сути, построение векторной диаграммы целесообразно во всех случаях, *когда к рассматриваемому реле подаются две или более электрические величины*: разность токов в максимальной токовой или дифференциальной защите, ток и напряжение в реле направления мощности или в направленном реле сопротивления. *Векторная диаграмма позволяет сделать заключение о том, как рассматриваемая защита будет работать при КЗ*, т. е. оценить правильность ее включения. Взаимное расположение векторов токов и напряжений на диаграмме определяется характеристикой рассматриваемой цепи, а также условно принятыми положительными направлениями токов и напряжений.

Для примера рассмотрим две векторные диаграммы.

На рис. 1.7 показана однофазная цепь переменного тока, состоящая из генератора и последовательно соединенных емкостного, активного и индуктивного сопротивлений. Примем при этом, что индуктивное сопротивление больше емкостного ($X_L > X_C$). Положительные направления токов и напряжений, так же как и в случаях, рассмотренных выше, обозначены на рис. 1.7,а стрелками.

Построение векторной диаграммы начнем с вектора ЭДС E , который расположим на рис. 1.7,б вертикально. Ток, проходящий в рассматриваемой цепи, определится из следующего выражения:



$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

Поскольку в рассматриваемой цепи имеются активные и реактивные сопротивления, причем , вектор тока отстает от вектора

Рис.1.7 К расчету цепи переменного тока
а) – схема цепи; б) – векторная диаграмма
напряжения на угол ϕ : $X_L > X_C$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$$

Напряжение в точке n на рис. 1.7, а определится согласно следующему выражению:

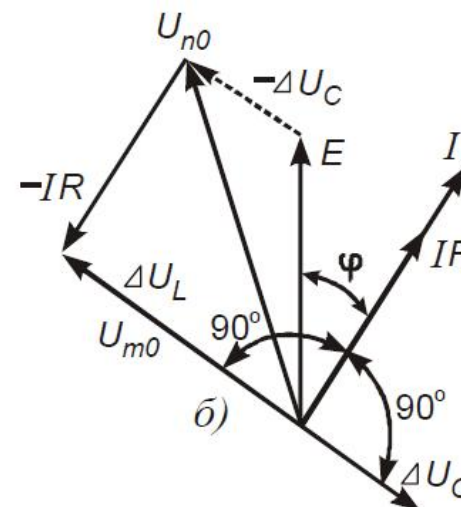
$$\overline{U}_{no} = \overline{E} - \Delta \overline{U}_C$$

На рис. 1.7, б построен вектор \dot{U}_C отстающий от вектора \dot{I} на угол 90° . Напряжение в точке n \dot{U}_{no} определится разностью векторов \dot{E} и \dot{U}_C . Напряжение в точке m определится аналогично:

$$\dot{U}_{mo} = \dot{U}_{no} - \dot{I}R$$

Как видно из рас. 1.7,б, этот последний вектор \dot{U}_{mo} будет равен

падению напряжения в индуктивном сопротивлении $\Delta \dot{U}_L$



Рассмотрим другую цепь переменного тока, приведенную на рис. 1.8,а, и построим векторную

диаграмму, характеризующую распределение токов в параллельных ветвях. Для построения диаграммы примем, что активное и емкостное сопротивления равны:

Построение векторной диаграммы начнем с вектора I_1 , который расположим горизонтально.

Затем построим вектор падения напряжения на сопротивлениях ΔU , отстающий от вектора I_1 на угол ϕ , так как результирующее сопротивление имеет активно-емкостный характер. Угол определяется следующим

выражением:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_c}{R}$$

В рассматриваемом случае $\phi = 45^\circ$. Вектор тока I_2 , проходящего по активному сопротивлению, совпадает с ΔU , а I_3 опережает ΔU на 90° , как показано на рис. 1.8,б.

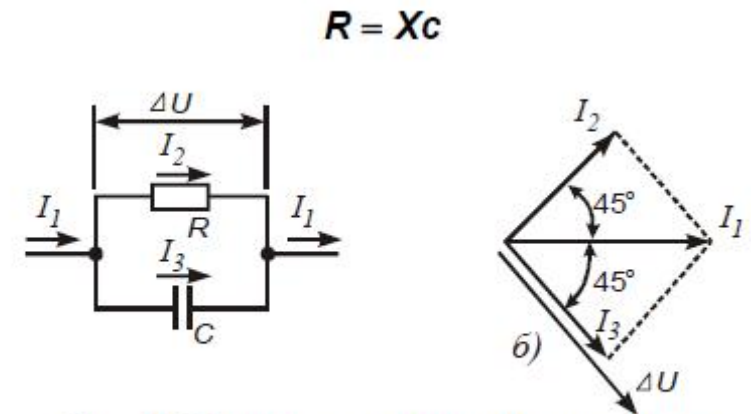


Рис.1.8. К расчету распределения тока.
а) – схема цепи; б) – векторная диаграмма токов

Векторные диаграммы при наличии трансформации.

При наличии в электрической цепи трансформаторов необходимо ввести дополнительные условия, для того чтобы сопоставлять векторные диаграммы токов и напряжений на разных сторонах трансформатора.

Положительные направления токов

при этом следует задавать с учетом полярности

обмоток трансформатора. В зависимости от

направления намотки обмоток трансформатора

взаимное направление токов в них меняется. Для того

чтобы определять направление токов в обмотках

силового трансформатора и сопоставлять их между

собой, обмоткам трансформатора дают условные

обозначения «начало» и «конец».

между источником ЭДС и нагрузкой включим трансформатор (рис. 1.9, а). Обозначим начала обмоток силового трансформатора буквами A и a , концы - X и x . При этом следует иметь в виду, что начало одной из обмоток принимается произвольно, а второй - определяется на основании условных положительных направлений токов, заданных для обеих обмоток трансформатора.

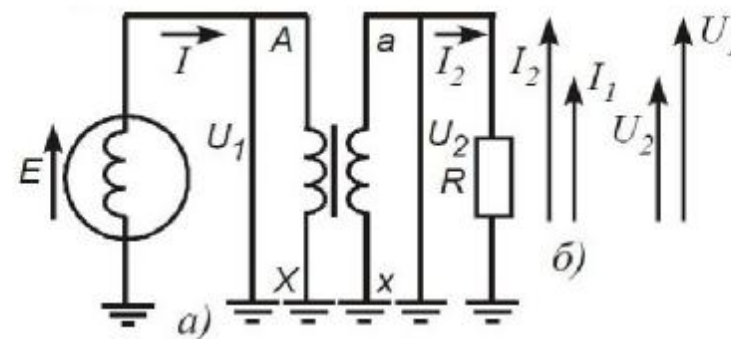
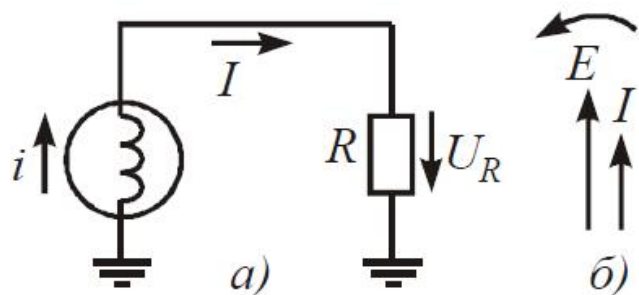


Рис.1.9. К определению условных положительных направлений токов и напряжений в обмотках трансформатора.

а) – схема цепи; б) – диаграмма токов и напряжений в обмотках трансформатора.

На рис. 1.9, а показаны положительные направления токов в обмотках силовых трансформаторов. В первичной обмотке положительным считается направление тока от



начала к концу, а во вторичной — от конца к началу. При таких условно принятых положительных направлениях токов в

обмотках трансформатора направление тока в нагрузке остается таким же, каким оно было бы при отсутствии трансформатора и непосредственном подключении нагрузки к генератору (см. рис. 1.3). При этом, поскольку магнитные потоки, создаваемые в магнитопроводе трансформатора обоими токами (первичным и вторичным), направлены встречно (рис. 1.10), для идеального трансформатора, пренебрегая током намагничивания:

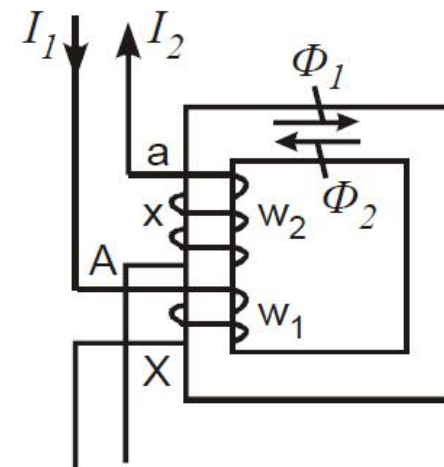


Рис. 1.10. Принцип устройства трансформатора.

$$\Phi_1 - \Phi_2 = 0 \text{ или } \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2 = 0 \quad (1.5)$$

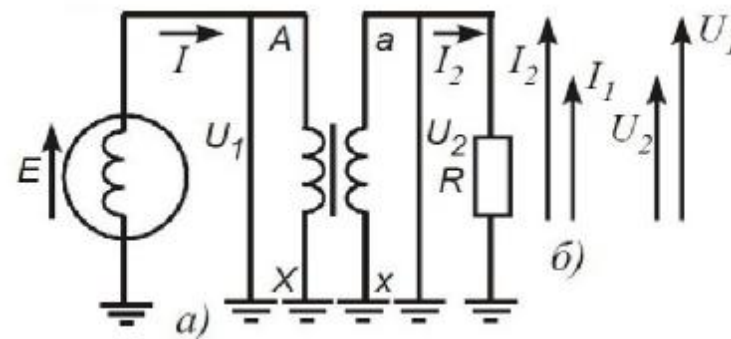
где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки в магнитопроводе трансформатора, а $\dot{I}_1 w_1$ и $\dot{I}_2 w_2$ — магнитодвижущие силы (МДС), создающие эти потоки.

Из последнего уравнения:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \left(\frac{w_2}{w_1} \right) \quad (1.6)$$

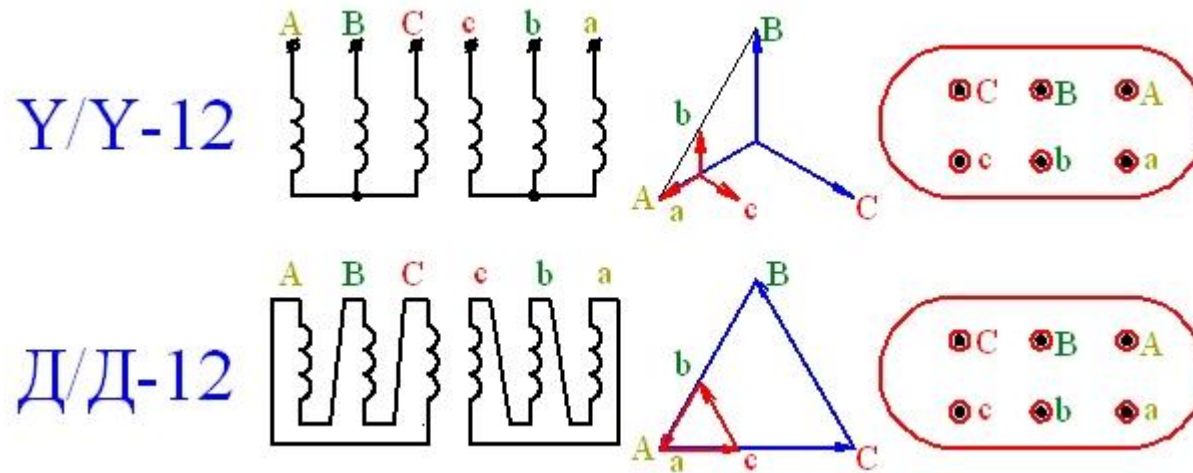
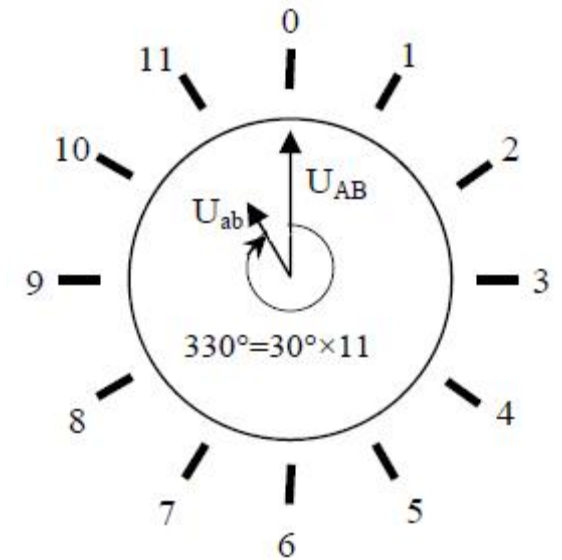
Согласно последнему равенству векторы I_1 и I_2 имеют одинаковые знаки и, следовательно, будут совпадать по направлению (см. рис. 1.9,б). Таким образом, условно принятые положительные направления токов в обмотках трансформатора удобны тем, что векторы первичного и вторичного токов на векторной диаграмме совпадают по направлению (рис.

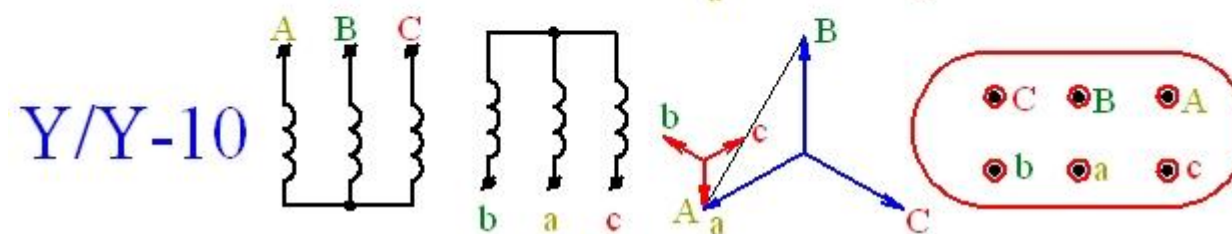
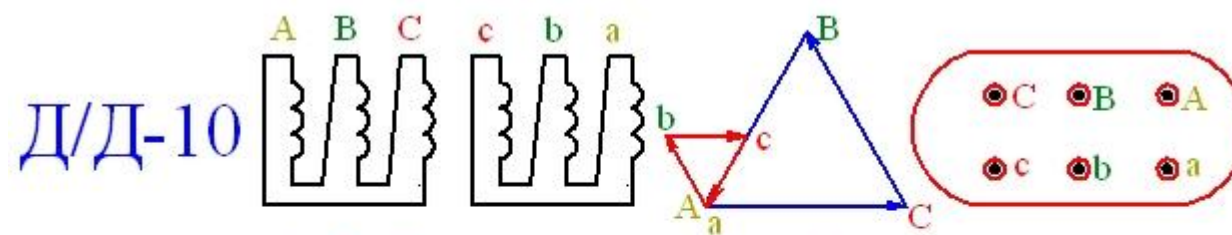
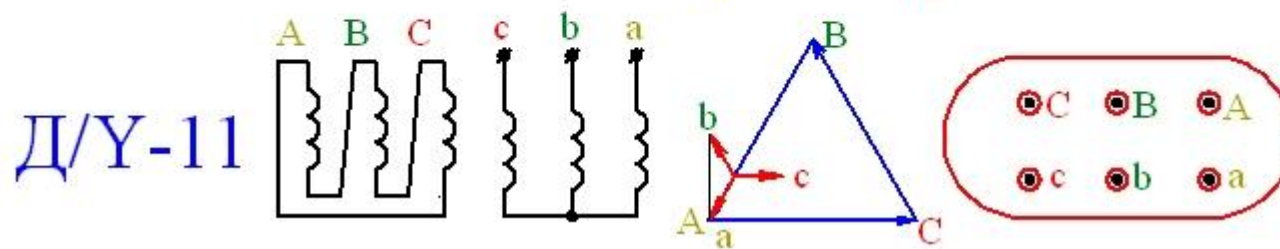
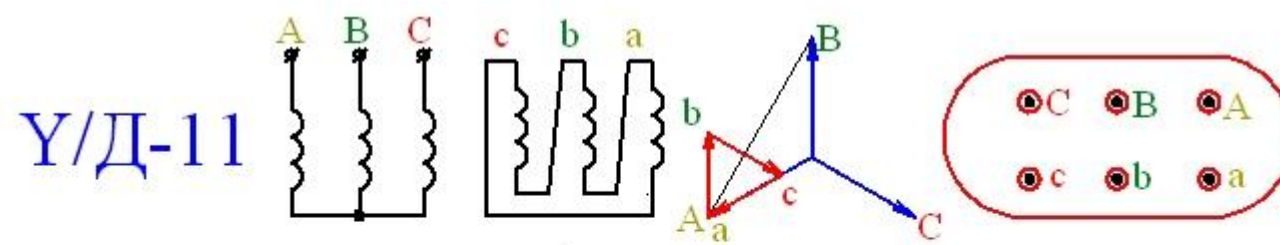
1.9,б). Для напряжений также удобно принять такие положительные направления, чтобы векторы первичного и вторичного напряжений на обмотках совпадали, как показано на рис. 1.9.



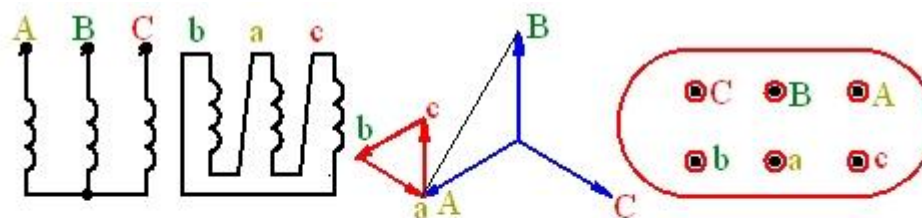
В зависимости от схемы соединения обмоток трансформатора (в звезду или треугольник), способа соединения выводов для образования треугольника и порядка подключения фаз сети к выводам трансформатора возможно получение различных групп соединения.

Группой соединения трансформатора считается сдвиг по фазе линейного (фазного) напряжения обмотки НН по отношению к одноименному линейному (фазному) напряжению обмотки ВН. Группы соединения принято определять по циферблату часов, считая вектор напряжения ВН исходным и направленным на цифру 12.

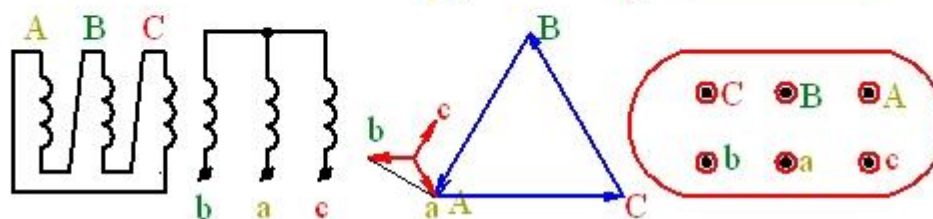




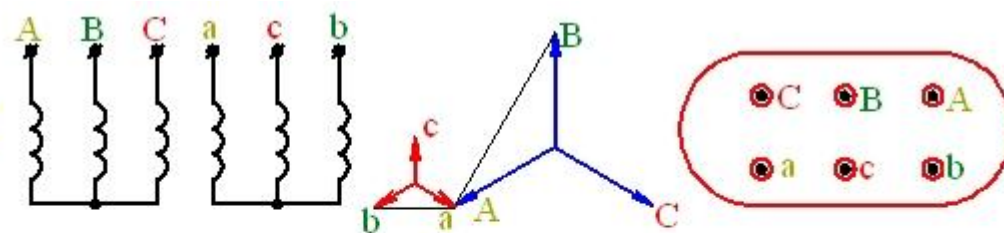
Y/Д-9



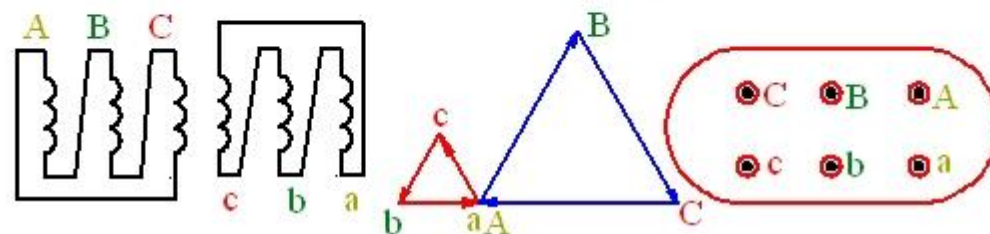
Д/Y-9

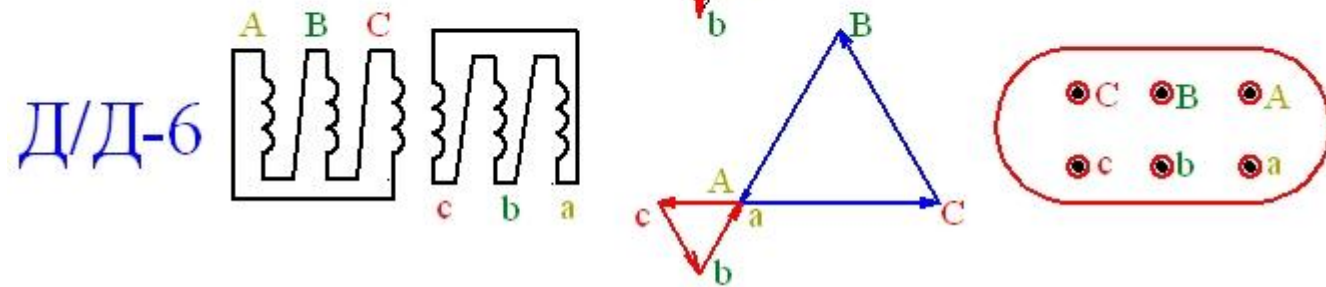
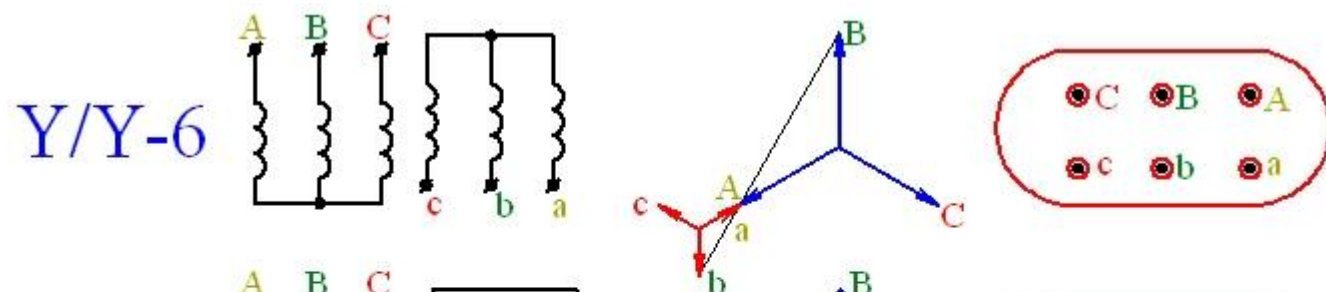
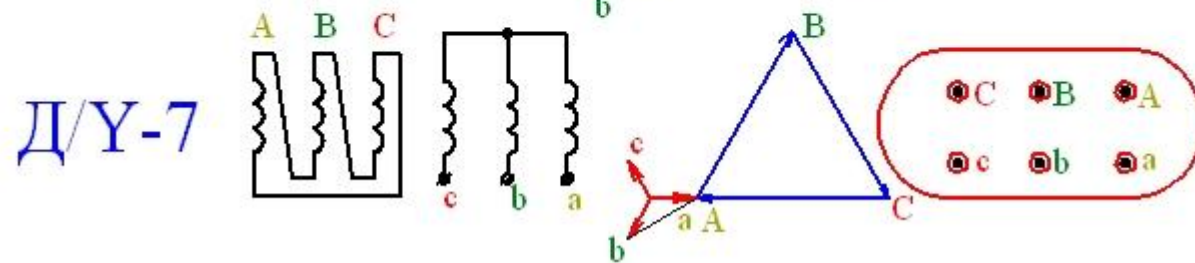
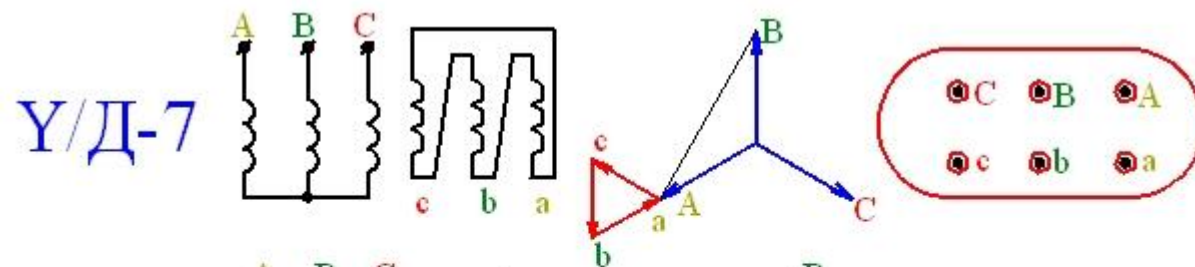


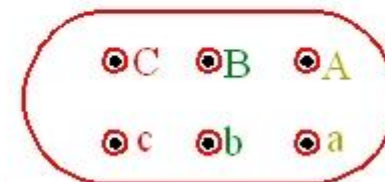
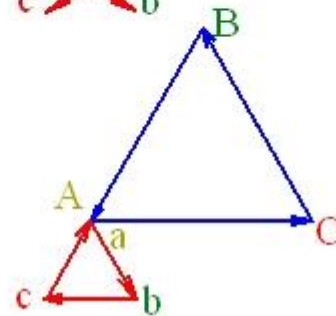
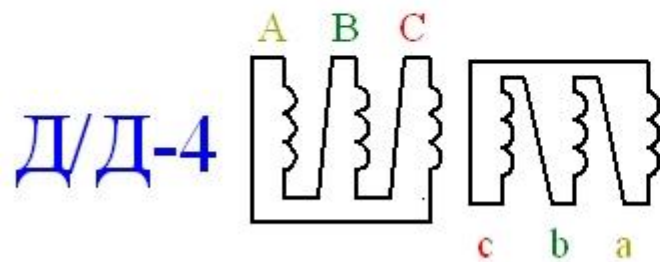
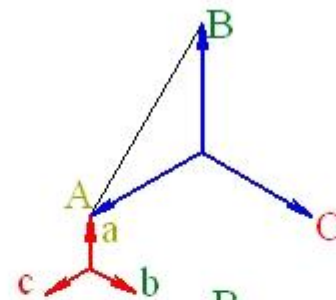
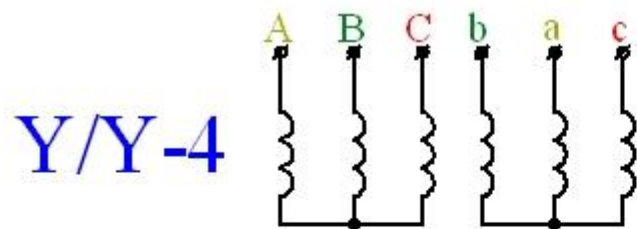
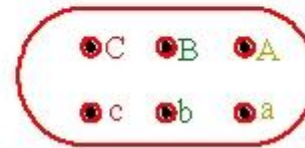
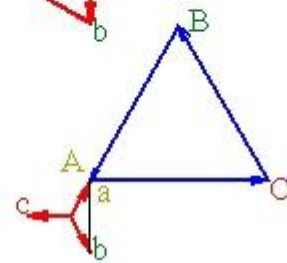
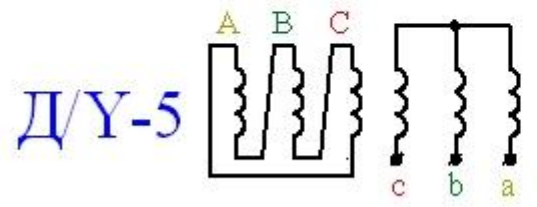
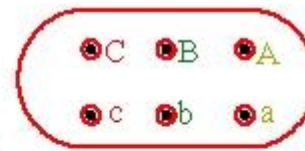
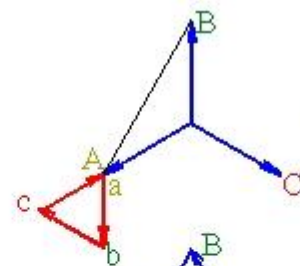
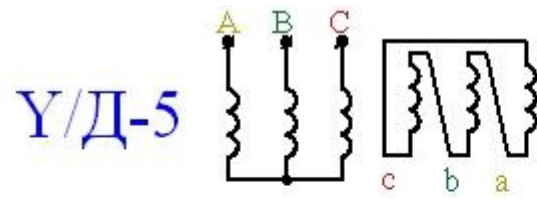
Y/Y-8



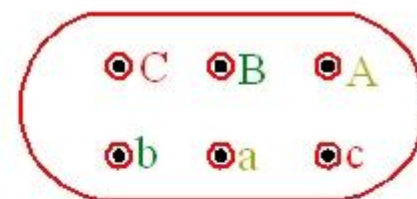
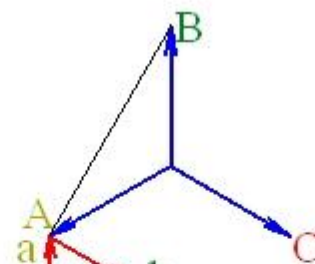
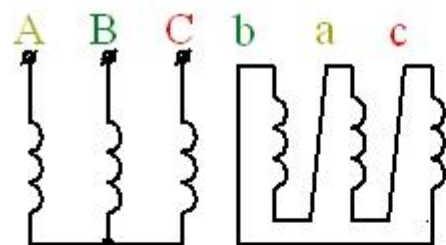
Д/Д-8



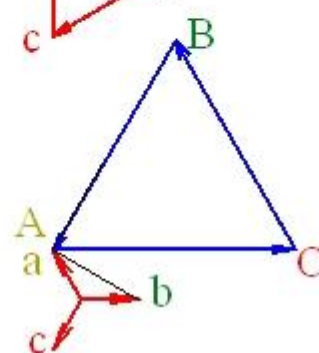
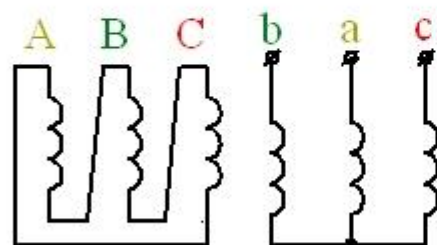




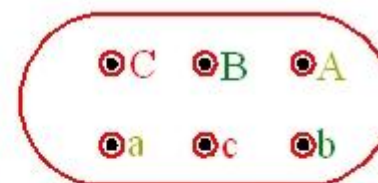
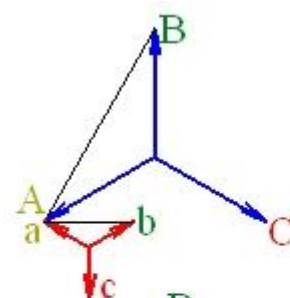
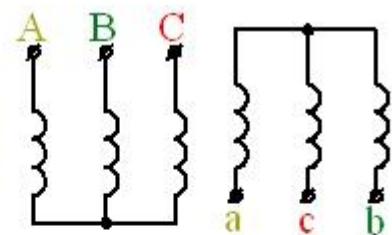
Y/Д-3



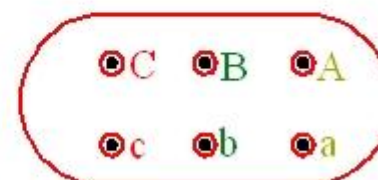
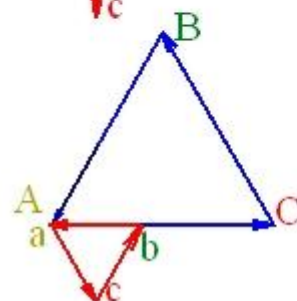
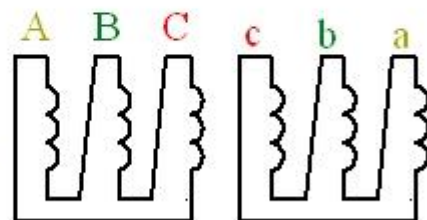
Д/Y-3

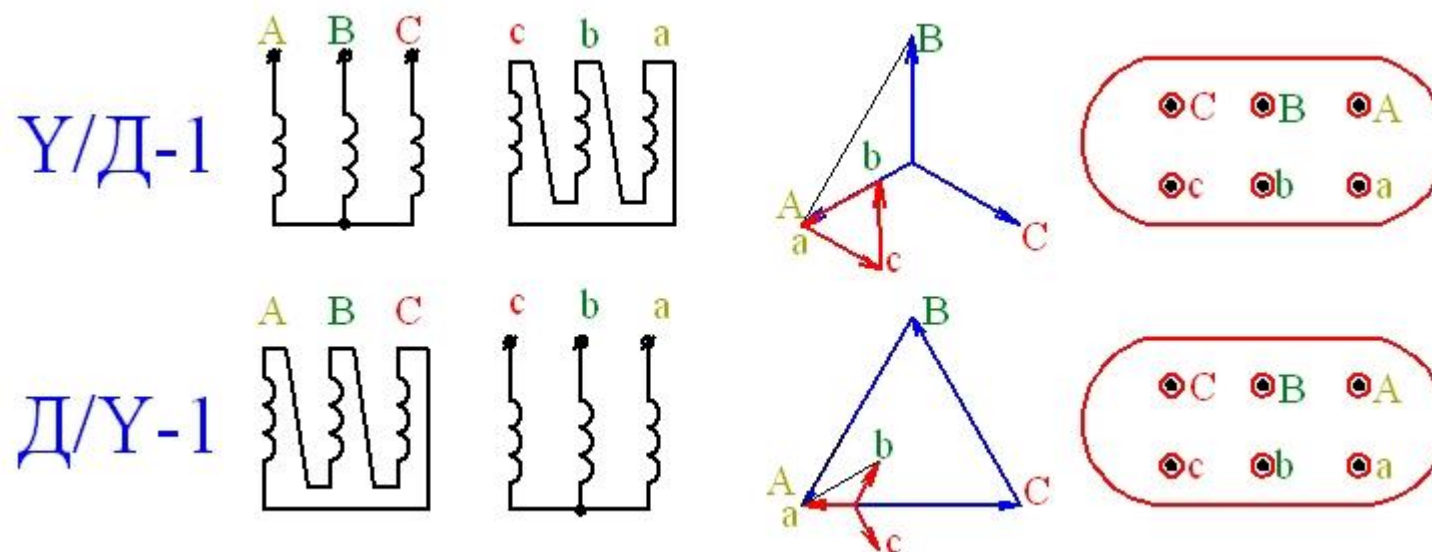


Y/Y-2



Д/Д-2





Рассмотрим схему соединений трансформатора **Y/Δ-11**, и векторные диаграммы напряжений и токов, соответствующие данной схеме соединения. На стороне высшего напряжения, где обмотки соединены в звезду, междуфазные напряжения в $\sqrt{3}$ раз превышают фазные напряжения. На стороне же низшего напряжения, где обмотки соединены в треугольник, междуфазные и фазные напряжения равны. Векторы междуфазных напряжений стороны низшего напряжения опережают на 30° аналогичные векторы междуфазных напряжений стороны высшего напряжения, что и соответствует схеме соединений Y/Δ-11.

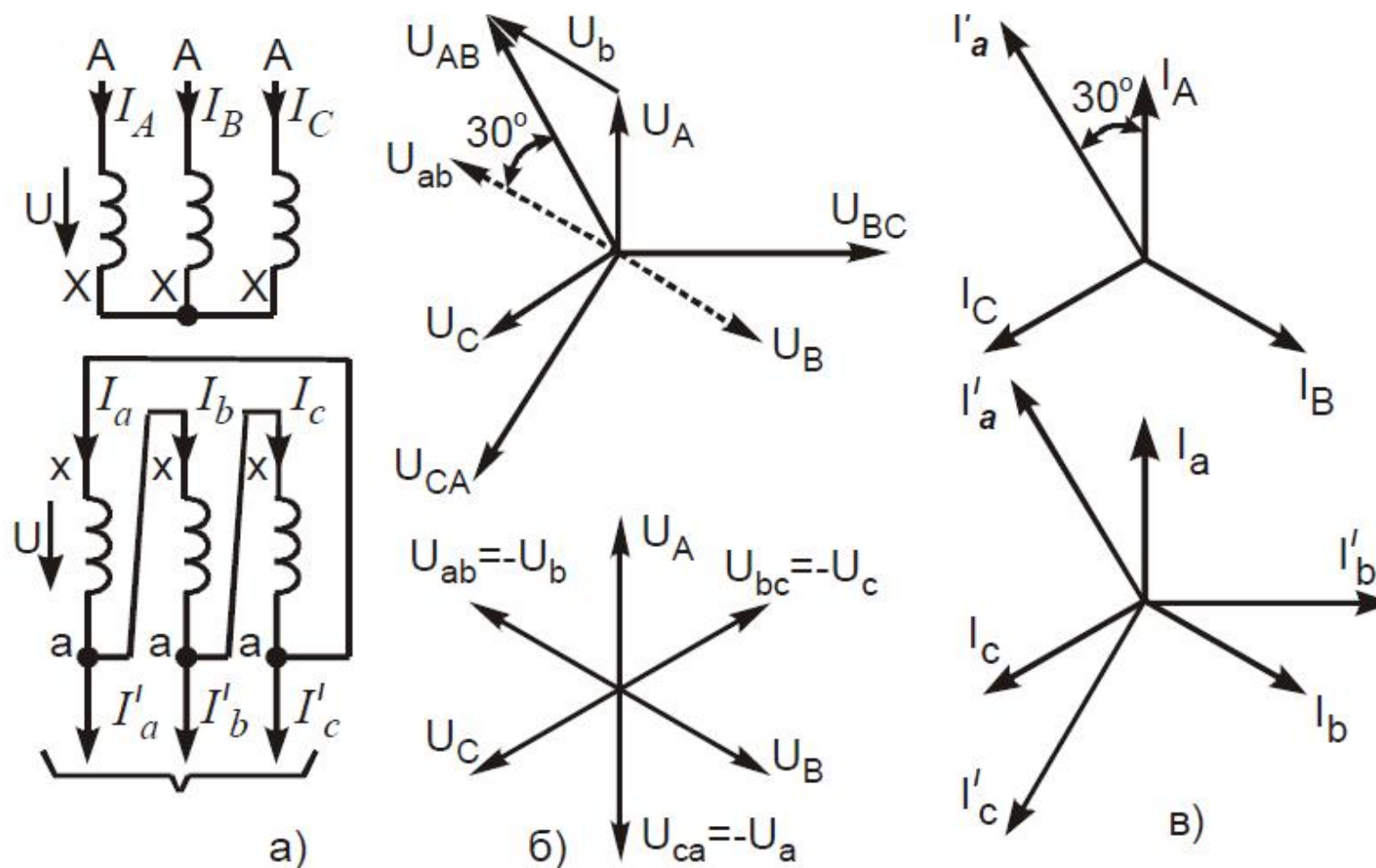


Рис. 1.12 Включение трансформатора по схеме Y/Δ-11:
 а) – схема соединения обмоток;
 б) – векторная диаграмма напряжений;
 в) – векторная диаграмма токов

При определении группы соединений силового трансформатора удобно за положительные принимать направления от выводов низшего напряжения к шинам, так как при этом векторные диаграммы токов совпадают с принятым обозначением групп соединения силовых трансформаторов (см. рис. 1.12,б и в). Аналогично могут быть построены векторные диаграммы токов и для других групп соединения силовых трансформаторов. Сформулированные выше правила построения векторных диаграмм токов и напряжений в схемах с трансформаторами действительны и для измерительных трансформаторов тока и напряжения.