

## **2.5 Схема замещения трансформатора и ее параметры**

Первичные и вторичные токи, напряжения и другие величины имеют одинаковый порядок, если у первичной и вторичной обмоток число витков одинаково. Рассмотрим поэтому вместо реального трансформатора эквивалентный ему т.н. приведенный трансформатор, первичные и вторичные обмотки которого имеют одинаковое число ВИТКОВ.

Заменяем реальную вторичную обмотку трансформатора с числом витков  $w_2$  воображаемой с числом витков, или приведенной, обмоткой с числом витков  $w_2' = w_1$ . При этом число витков вторичной обмотки изменится в

$$k = w_2'/w_2 = w_1/w_2$$

Величина  $k$  называется *коэффициентом приведения* или *трансформации*.

В результате замены или приведения, ЭДС и напряжение приведенной обмотки

$$E_2' = kE_2; \quad U_2' = kU_2$$

Чтобы мощность приведенной и реальной обмоток при всех режимах работы были равны, необходимо соблюдать равенство

$$U_2' I_2' = U_2 I_2.$$

Отсюда с учетом последних равенств

$$I_2' = I_2 / k$$

Сопротивления вторичной обмотки трансформатора

$$r_2' = k^2 r_2; \quad x_2' = k^2 x_2$$

Схема замещения двухобмоточного трансформатора приведена на рис.2.18.

Уравнения равновесия трансформатора:

$$\begin{aligned} U_1 &= r_1 \cdot I_1 + j \cdot I_1 \cdot x_1 + j \cdot x'_{12} \cdot (I_1 + I'_2) \\ -U'_2 &= r'_2 \cdot I'_2 + j \cdot x'_{12} \cdot (I_1 + I'_2) \end{aligned}$$

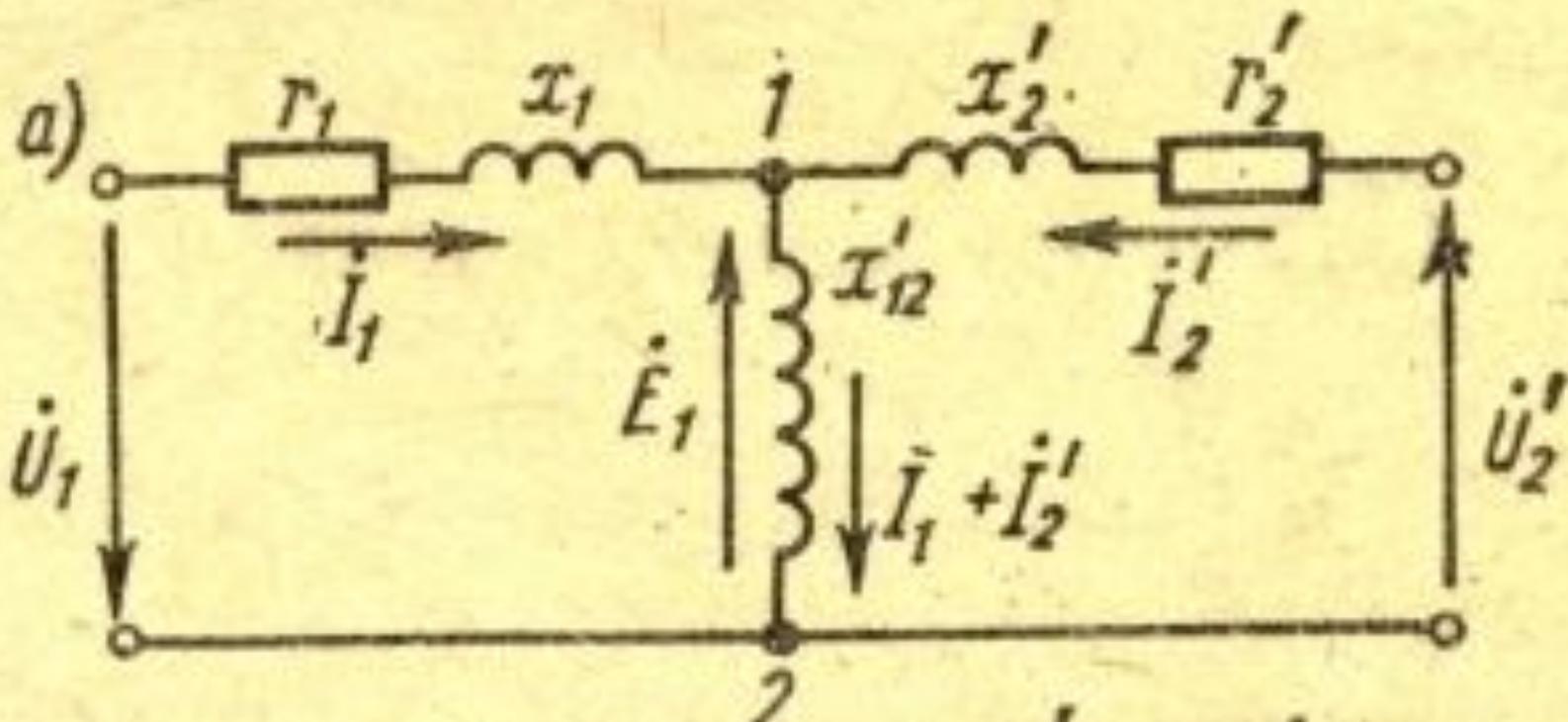


Рис.2.18

# Векторная диаграмма трансформатора

---

*(Самостоятельно)*

## *2.6 Коэффициент полезного действия трансформатора*

---

Потери активной мощности в трансформаторе подразделяются на электрические потери в обмотках и магнитные потери в магнитопроводе.

Значения потерь определяется расчетным путем при проектировании трансформатора или опытным путем в готовом трансформаторе.

Коэффициент полезного действия трансформатора вычисляется в предположении, что полезная мощность трансформатора выражается соотношением

$$P_2 = m \cdot U_{2H} \cdot k_{HG} \cdot I_{2H} \cdot \cos \varphi_2 = k_{HG} \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2$$

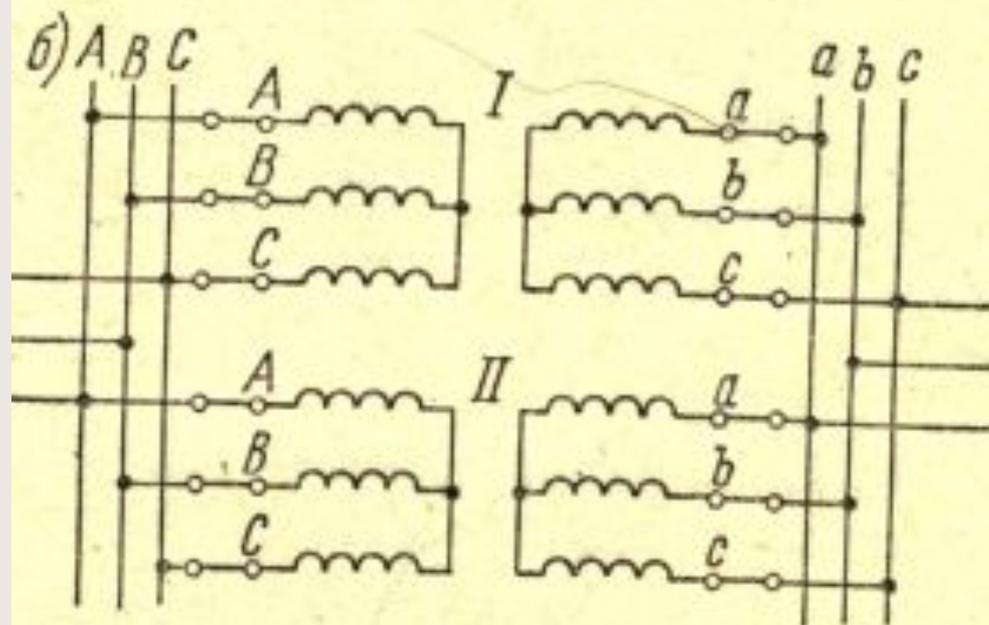
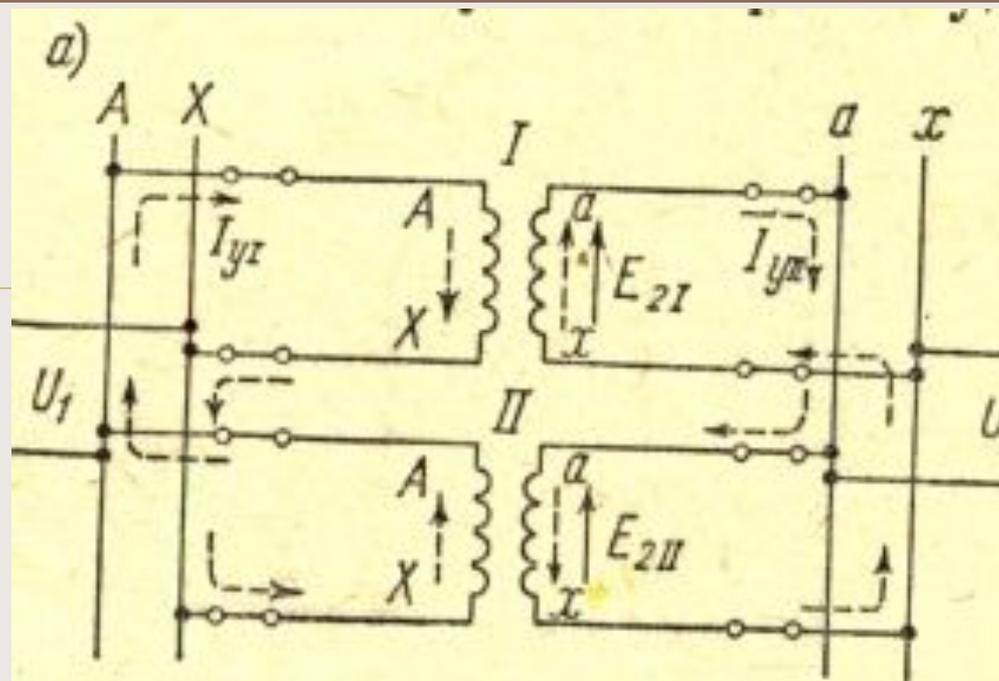
где  $k_{HG}$  – коэффициент нагрузки трансформатора

КПД трансформатора  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$  имеет максимальное значение при такой нагрузке, при которой переменные потери равны постоянным.

## *2.7. Параллельная работа трансформаторов*

Параллельная работа трансформаторов (рис.2.19) необходима для:

- обеспечения резервирования в энергоснабжении потребителей в случае аварии и необходимости ремонта трансформаторов;
- уменьшения потерь энергии в периоды малых нагрузок путем отключения части параллельно работающих трансформаторов.



Для достижения наилучших условий параллельной работы трансформаторов необходимо, чтобы общая нагрузка подстанции распределялась между параллельно работающими трансформаторами пропорционально их номинальным мощностям.

Такое распределение нагрузки достигается при условиях, когда параллельно работающие трансформаторы имеют:

- одинаковые группы соединений обмоток
- равные первичные и вторичные номинальные напряжения (равные коэффициенты трансформации)
- равные напряжения короткого замыкания.

Если первые два условия соблюдены, то вторичные напряжения соответствующих фаз параллельно включенных трансформаторов на х.х., когда вторичные обмотки разомкнуты, будут равны по значению и по фазе. Поэтому при включении вторичных обмоток на общие шины в этих обмотках при отсутствии нагрузки не возникнет никаких токов. В противном случае уже на х.х. возникают уравнительные токи, которые будут циркулировать по замкнутым контурам, образуемым вторичными обмотками параллельно включенных трансформаторов и трансформироваться также в первичные обмотки.

На рис.2.19а такие токи показаны штриховыми стрелками. Уравнительные токи, если даже и не очень велики и поэтому не приводят к аварии, складываясь при подключении потребителей с токами нагрузки, вызывают неравномерную нагрузку, а также излишние потери и нагрев трансформаторов.

Соблюдение третьего условия обеспечивает равномерное распределение нагрузки между трансформаторами. Если же это условие не выполняется, то при повышении нагрузки номинальной мощности прежде всего достигнет трансформатор с наименьшим значением напряжения к.з. Другие трансформаторы при этом будут еще недогружены, и в то же время дальнейшее увеличение общей нагрузки недопустимо, т.к. первый трансформатор будет перегружаться. Установленная мощность трансформаторов останется, таким образом, недоиспользованной.

## *2.8. Регулирование напряжения трансформаторов*

При изменении нагрузки в энергосистеме происходит изменение напряжения.

Уменьшение напряжения даже на 3-5% по сравнению с номинальным приводит к увеличению токов, потребляемых ЭМ, что неблагоприятно сказывается на работе электрооборудования. Поэтому возникает необходимость в регулировании вторичного напряжения трансформаторов.

Изменять вторичное напряжение можно путем изменения числа витков вторичной обмотки или изменения потока трансформатора, сцепленного со вторичной обмоткой.. Наибольшее распространение нашел способ, связанный с изменением числа витков вторичной или первичной обмотки трансформатора, т.е. изменением коэффициента трансформации.

Для изменения коэффициента трансформации обмотки выполняются с ответвлениями, чем и обеспечивается ступенчатое регулирование напряжения (рис.2.20).

Стандартные трансформаторы средней мощности имеют в соответствии с ГОСТ пять ответвлений.

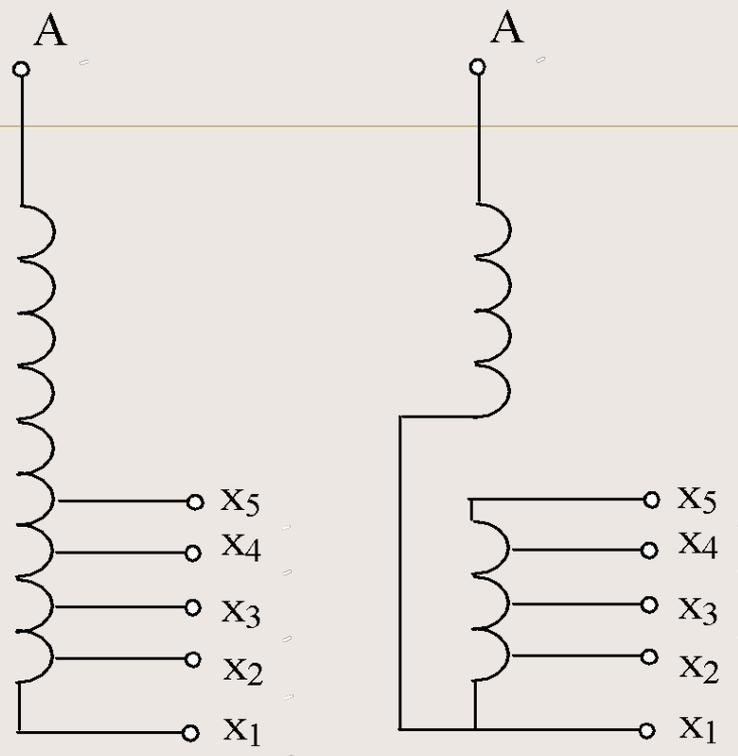


Рис. 2.20. Схемы обмоток с ответвлениями для ступенчатого регулирования напряжения

Среднее соответствует номинальному напряжению, а два других – напряжениям, отличающимся от номинального на

**$\pm 2,5\%$  и  $\pm 5\%$**

Трансформаторы большей мощности имеют большее число ответвлений.. Ответвления чаще выполняются на стороне высокого напряжения, т.к. регулирование может быть проведено с большей точностью, а переключатель получается более компактным.

При этом различают два способа регулирования напряжения трансформаторов: переключение ответвлений (отпаек) трансформатора при отключении от сети и регулирование напряжения под нагрузкой. При втором способе переключатель получается более сложным.

В последнее время появилась необходимость стабилизировать, поддерживать с большой точностью неизменным напряжение на выводах ответственных потребителей.. Стабилизаторы напряжения стали широко применяться также и при питании бытовых приборов и телевизоров.

Высокая стабилизация напряжения достигается путем изменения коэффициента трансформации. При этом для переключения числа витков обмотки используются управляемые полупроводниковые приборы - тиристоры и транзисторы.

## 2.9. Разновидности трансформаторов

---

### *2.9.1. Трехобмоточные трансформаторы*

Это трансформаторы у которых имеется одна первичная и две вторичные обмотки (рис.2.21). Такие трансформаторы используются на электрических станциях и подстанциях для питания распределительных сетей с различными номинальным напряжениями и позволяют достичь экономии в капитальных затратах за счет установки меньшего числа трансформаторов.

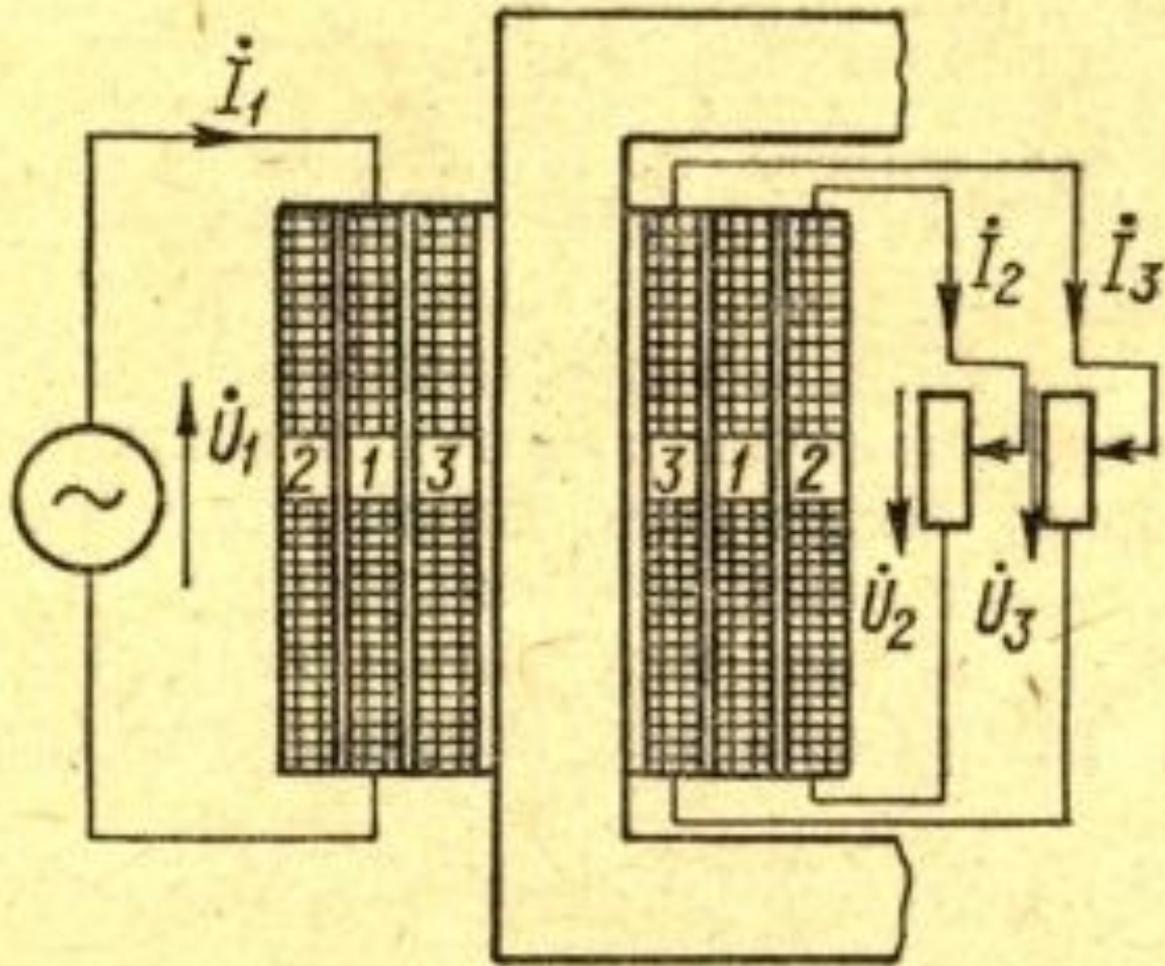


Рис. 2.21

## *2.9.2. Автотрансформаторы*

В обычных трансформаторах первичные и вторичные обмотки имеют между собой только магнитную связь. В ряде случаев вместо таких трансформаторов экономически целесообразно применять трансформаторы, в которых первичные и вторичные обмотки имеют также электрическую связь. Такие трансформаторы называются *автотрансформаторами*.

В автотрансформаторе (рис.2.22) первичная обмотка  $w_1$  включается в сеть параллельно, а вторичная  $w_2$  – последовательно. Устройство обмоток и их расположение на стержнях такие же, как и в обычном трансформаторе, однако ввиду электрической связи обмоток изоляция каждой из них относительно корпуса должна быть рассчитана на напряжение сети высшего напряжения.

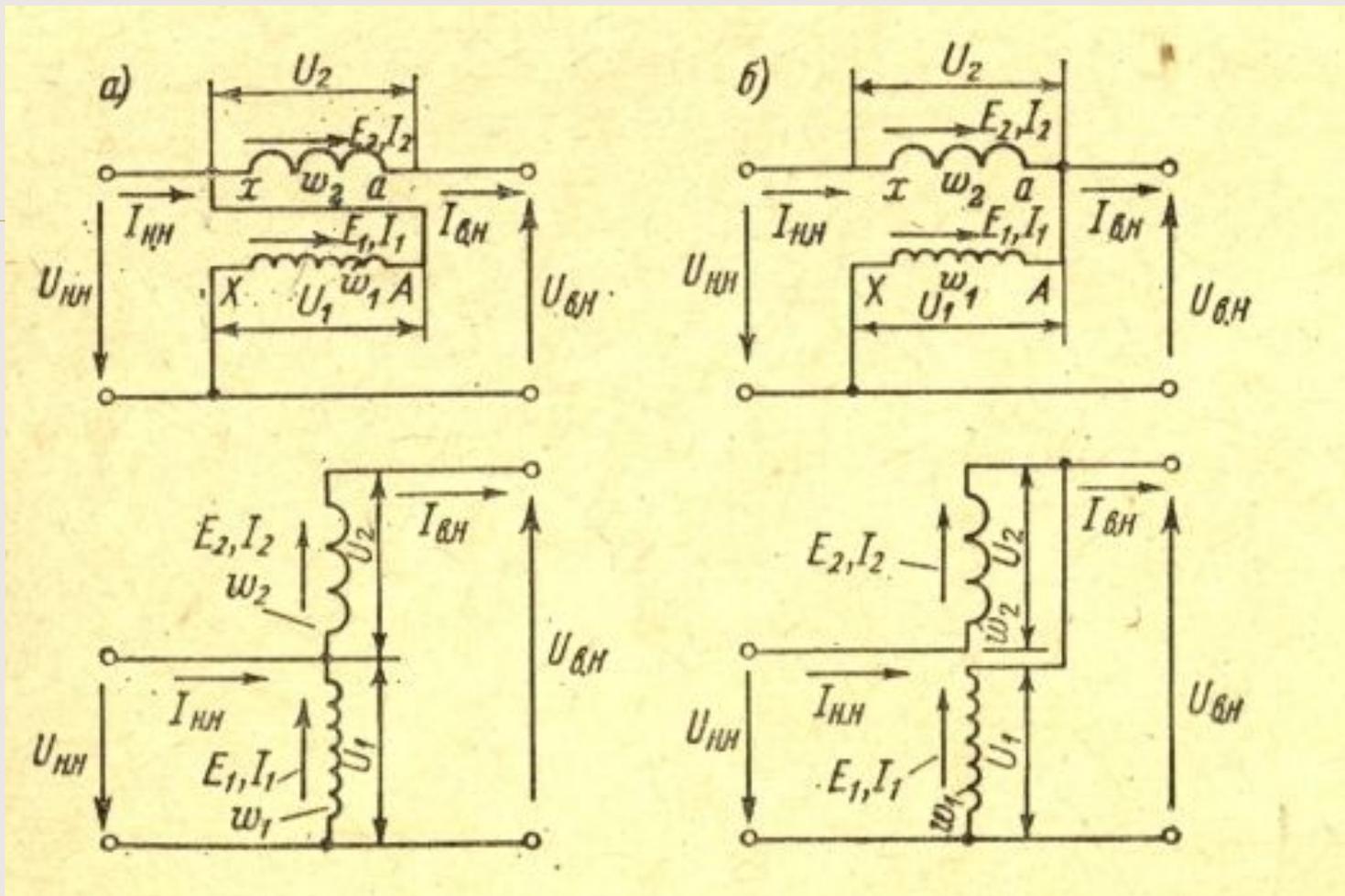
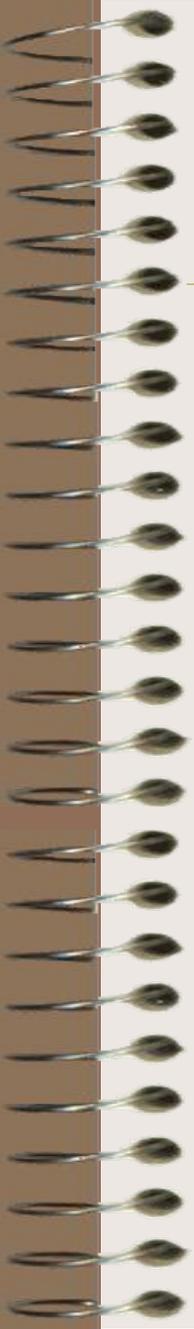


Рис.2.22

На рис.2.22б показаны две возможные схемы соединения обмоток трансформатора, причем каждая схема представлена в двух различных изображениях. На рис.2.22а первичная обмотка включается в сеть НН, а на рис.2.22б – в сеть ВН. В обоих случаях напряжение вторичной обмотки складывается с напряжением НН.



---

Автотрансформатор служит как для повышения, так и для понижения напряжения.

## 2.9.3. Сварочные трансформаторы

Для электрической дуговой сварки применяются трансформаторы с вторичным напряжением, обеспечивающим надежное зажигание и устойчивое горение дуги. Для ручной сварки используются трансформаторы с напряжением на х.х. 60-75 В при номинальной нагрузке 30 В. Для ограничения сварочного тока при к.з. и устойчивого горения дуги трансформатор должен иметь круто падающую внешнюю характеристику  $U_2 = f(I_2)$ , а сварочная цепь – значительную индуктивность. Для регулирования сварочного тока значение этой индуктивности должно быть регулируемым.

Широко используются сварочные трансформаторы с дополнительной регулируемой реактивной катушкой (рис.2.23). При уменьшении с помощью соответствующего механизма зазора  $\delta$  в магнитной цепи катушки ее индуктивность возрастает.

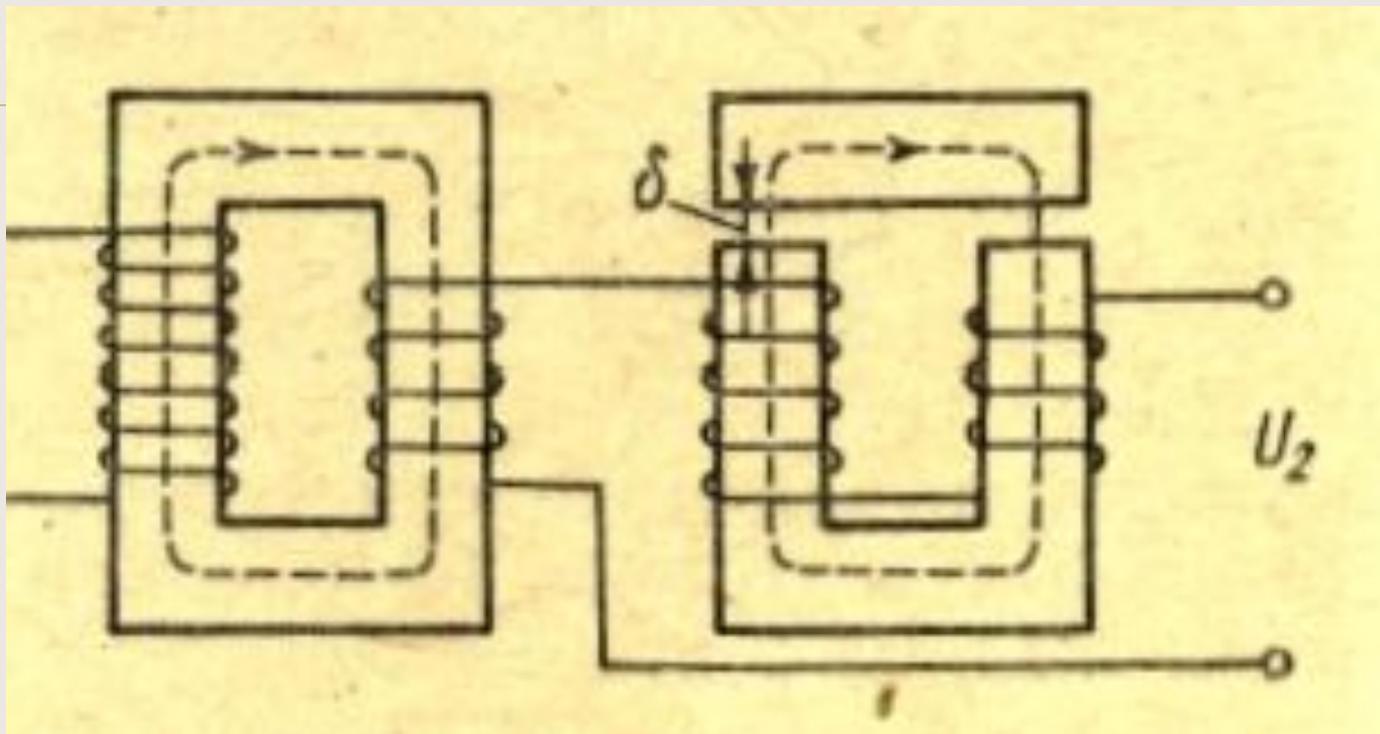


Рис.2.23

## *2.9.4. Последовательные трансформаторы*

Трансформаторы последовательного включения близки по своим характеристикам к автотрансформаторам. Применяются – в высоковольтных сетях для регулирования напряжения по амплитуде и фазе в отдельных участках энергосистемы.

Для энергосистемы важное значение имеет компенсация падения напряжения на отдельных ее участках. Когда регулируется только амплитуда напряжения, имеет место *продольное регулирование*. Если изменяется фаза напряжения, а амплитуда остается неизменной, говорят о *поперечном регулировании напряжения*. При этом в системе изменяется  $\cos \varphi$  .

Когда изменяются и амплитуда, и фаза напряжения, имеет место *продольно-поперечное регулирование* напряжения. При этом регулируется активная и реактивная мощности.

Последовательный трансформатор – это регулировочный трансформатор, имеющий две вторичные обмотки, с которых отдельно может сниматься регулируемое напряжение. По существу это трехобмоточный трансформатор с одной первичной и двумя вторичными обмотками.

Трансформатор для продольно-поперечного регулирования напряжения получается громоздким и дорогим, поэтому чаще применяется только продольное регулирование. В этом случае регулировочный трансформатор имеет одну вторичную регулируемую под нагрузкой обмотку, что дает возможность создать более простую и надежную установку.

Последовательные трансформаторы находят широкое применение в качестве измерительных трансформаторов. При этом измерительные трансформаторы делятся на трансформаторы тока (ТТ) и напряжения (ТН). В ТТ во вторичную обмотку включается прибор или устройство автоматики с низким напряжением (рис. 2.24).

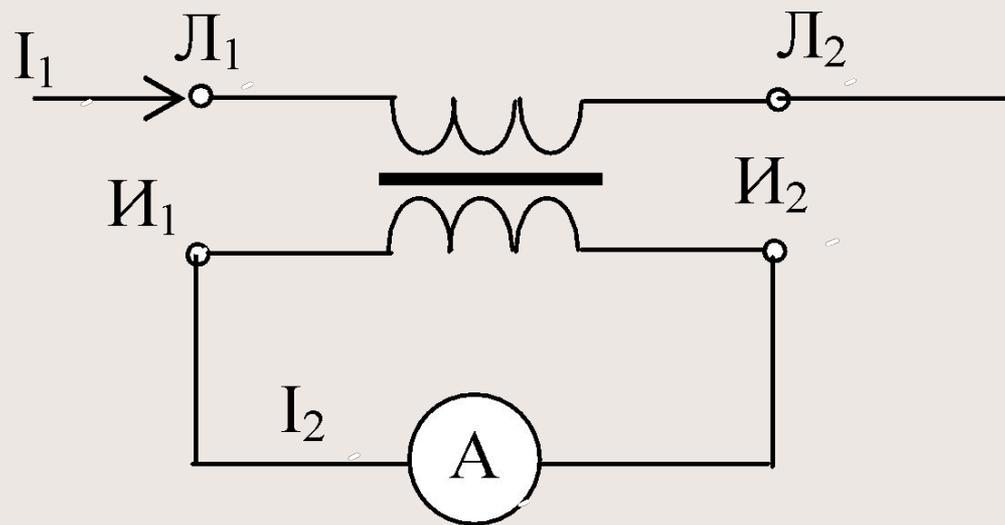


Рис. 2.24 Трансформатор  
тока

Ток в приборе будет пропорционален измеряемому току  $I_1$  .

ТТ выполняют на токи до 40 000 А, притоках во вторичных обмотках 1, 2, 2,5 и 5 А. По роду изоляции ТТ делятся на сухие (с воздушной, фарфоровой или другой твердой изоляцией) и масляные. ТТ применяются в высоковольтных сетях до 1150 кВ.

Трансформаторы напряжения применяются в высоковольтных сетях в качестве понижающих трансформаторов.

Измерительные трансформаторы изготавливаются на небольшую мощность до нескольких сотен ВА. Главное требование к ним при проектировании – малые погрешности при преобразовании токов и напряжений.

ТН применяются в качестве измерительных трансформаторов в высоковольтных сетях и для питания цепей релейной защиты и автоматики в сетях низшего напряжения.

ТН выполняются однофазными и трехфазными на напряжения 0,38 до 1150 кВ.

ТН выпускаются сухими или масляными. При напряжениях 220 кВ и выше применяются каскадные схемы, при этом облегчается выполнение изоляции трансформатора.

## *2.9.5. Трансформаторы для выпрямительных установок*

---

Трансформаторы, для которых нагрузкой являются цепи с нелинейными элементами в виде выпрямителей, тиристоров и транзисторов, работают в высокочастотных переходных режимах, когда токи и напряжения во вторичной обмотке несинусоидальные и не уравниваются токами первичной обмотки.

При этом нарушается равенство МДС первичной и вторичной обмоток, а в трехфазных тиристорных преобразователях происходят несимметричные к.з..

Неуравновешенные МДС подмагничивают магнитную систему, в обмотках трансформатора протекают несинусоидальные токи.

Все это приводит к снижению мощности трансформатора по сравнению с трансформатором, работающим на линейную нагрузку.

Для снижения пульсаций увеличивают число фаз трансформатора. Для ограничения токов в шестифазных выпрямительных схемах применяют включение уравнивательной катушки УК между нейтралями двух трехфазных групп (рис.2.25).

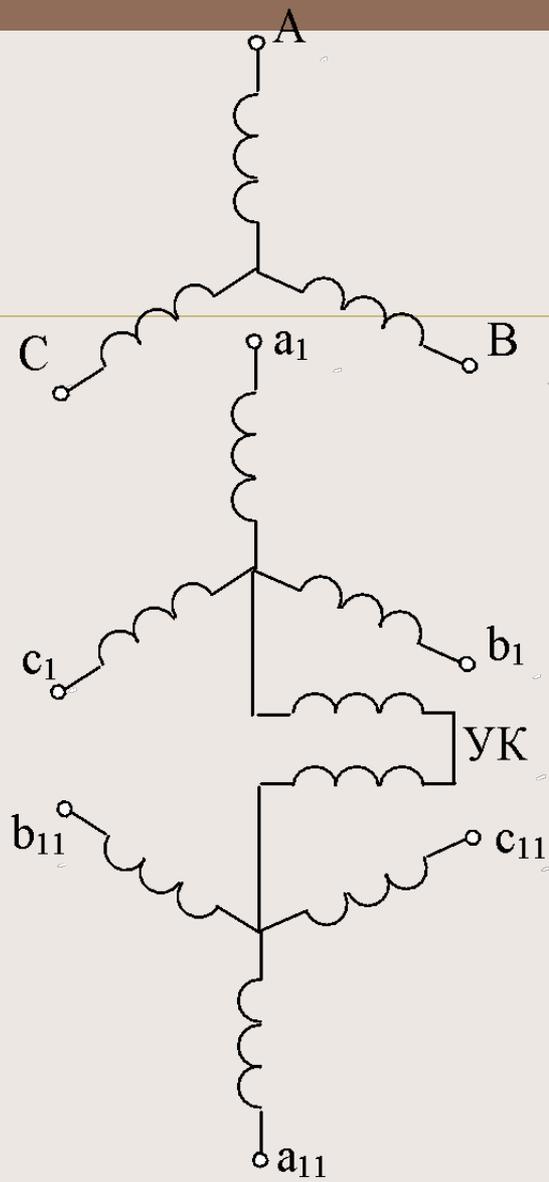


Рис. 2.25 Схема трансформатора с  
уравнительной катушкой между  
нейтралями

## 2.9.6. Реакторы

Применяются для ограничения токов к.з. и в качестве фильтров токов высоких гармоник. Конструкция реактора схожа с конструкцией трансформатора, только реактор имеет одну обмотку.

В последнее время в ЭП внедряются ТП, что приводит к появлению в энергосистемах токов высших гармоник, вредно влияющих на работу оборудования. Для ограничения напряжений и токов высших гармоник применяются реакторы-фильтры.

В установившемся режиме в энергосистеме количество потребляемой электроэнергии (с учетом потерь) равняется энергии, выработанной на электростанциях. В переходных режимах энергия запасается в виде кинетической энергии вращающихся частей ЭМ или в магнитных полях электротехнических устройств. При уменьшении частоты сети или отключении ЭМ и трансформаторов запасенная в магнитных полях энергия преобразуется в активную энергию. Для ограничения токов к.з., регулирования реактивной мощности и улучшения характера протекания п.п. применяются **реакторы**.

## ***2.9.7. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частот***

Применяются в устройствах связи, электроники и автоматики. Мощность – десятки ватт, а частоты – до 100 Гц. Такие трансформаторы называют ***микротрансформаторами***.

Среди микротрансформаторов особое место занимают импульсные трансформаторы или пик-трансформаторы, которые обеспечивают получение периодических импульсов напряжения – пиков напряжений.

Пик – трансформаторы выполняются двух модификаций: с магнитопроводом из стали с прямоугольной петлей гистерезиса или с магнитопроводом, имеющим насыщенный участок.

Для обеспечения синусоидальности тока и снижения перенапряжений в схему вводится активный резистор.

## *2.9.8. Трансформаторы числа фаз*

---

*(самостоятельно)*

## *2.9.9. Трансформаторы частоты*

---

*(самостоятельно)*

## *2.10. Проектирование трансформаторов*

---

*(Самостоятельно)*