

# Трансформатор



# Принцип действия и устройства трансформаторов

Простейший **трансформатор** представляет собой устройство, состоящее из стального сердечника и двух обмоток (рис. 1). При подаче в первичную обмотку переменного напряжения, во вторичной обмотке индуцируется ЭДС той же частоты. Если ко вторичной обмотке подключить некоторый электроприемник, то в ней возникает электрический ток и на вторичных зажимах трансформатора устанавливается напряжение, которое несколько меньше, чем ЭДС и в некоторой относительно малой степени зависит от нагрузки. Отношение первичного напряжения ко вторичному (коэффициент трансформации) приблизительно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток.

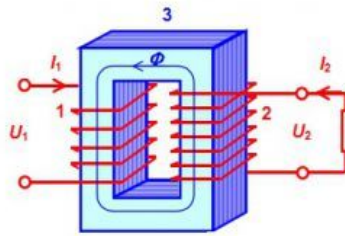


Рис. 1. Принцип устройства однофазного двухобмоточного трансформатора. 1 первичная обмотка, 2 вторичная обмотка, 3 сердечник.  $U_1$  первичное напряжение,  $U_2$  вторичное напряжение,  $I_1$  первичный ток,  $I_2$  вторичный ток,  $\Phi$  магнитный поток

Простейшие условные обозначения трансформаторов изображены на рис. 2; для наглядности разные обмотки трансформатора можно, как и на рисунке, представить разными цветами.

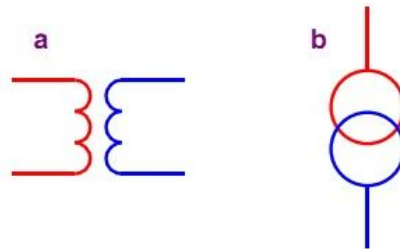


Рис. 2. Условное обозначение трансформатора в подробных (многолинейных) схемах (a) и в схемах электрических сетей (b)

Трансформаторы могут быть одно- или многофазными, а вторичных обмоток может быть больше одной. В электрических сетях обычно используются трехфазные трансформаторы с одной или двумя вторичными обмотками. Если первичное и вторичное напряжения относительно близки друг другу, то могут использоваться и однообмоточные автотрансформаторы, принципиальные схемы которых представлены на рис. 3.

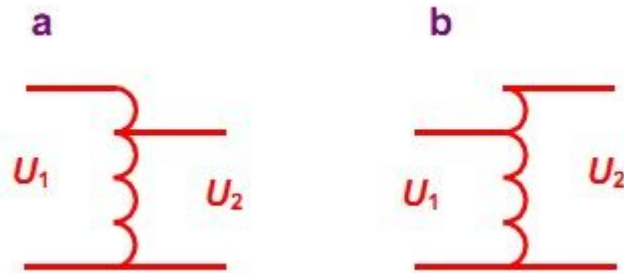


Рис. 3. Принципиальные схемы понижающего (а) и повышающего (б) автотрансформаторов

Важнейшими номинальными показателями трансформатора являются его номинальные первичное и вторичное напряжения, номинальные первичный и вторичный ток, а также номинальная вторичная полная мощность (номинальная мощность). Трансформаторы могут изготавливаться как на весьма малую мощность (например, для микроэлектронных цепей), так и на очень большую (например, для мощных энергосистем), охватывая диапазон мощностей от 0,1 мВА до 1000 МВА.

Потери энергии в трансформаторе – обусловленные активным сопротивлением обмоток потери в меди и вызванные вихревыми токами и гистерезисом в сердечнике потери в стали – обычно настолько малы, что КПД трансформатора, как правило, выше 99 %. Несмотря на это, тепловыделение в мощных трансформаторах может оказаться настолько сильным, что необходимо прибегать к эффективным способам теплоотвода. Чаще всего активная часть трансформатора размещается в баке, заполненном минеральным (трансформаторным) маслом, который, при необходимости снабжается принудительным воздушным или водяным охлаждением.

Основные преимущества сухих трансформаторов заключаются в более высокой огнебезопасности и в исключении течи трансформаторного масла, благодаря чему они могут без препятствий устанавливаться в любых частях зданий, в том числе на любом этаже. Для измерения переменного тока или напряжения (особенно в случае больших токов и высоких напряжений) часто используются измерительные трансформаторы.

Устройство трансформатора напряжения по своему принципу не отличается от силовых трансформаторов, но работает он в режиме, близком к холостому ходу; коэффициент трансформации в таком случае достаточно постоянен. Номинальное вторичное напряжение таких трансформаторов обычно равно 100 В. Вторичная обмотка трансформатора тока в идеальном случае короткозамкнута и вторичный ток в таком случае пропорционален первичному. Номинальный вторичный ток обычно составляет 5 А, но иногда может быть и меньше (например, 1 А)

Первым трансформатором может считаться изготовленное Майклом Фарадеем (Michael Faraday) индукционное кольцо (англ. induction ring), состоящее из кольцевого стального сердечника и двух обмоток, при помощи которого он 29 августа 1831 года открыл явление электромагнитной индукции (рис. 5). Во время быстрого переходного процесса, возникающего при включении или отключении первичной обмотки, соединенной с источником постоянного тока, во вторичной обмотке индуцируется импульсная ЭДС. Такое устройство может поэтому называться импульсным или транзиентным трансформатором

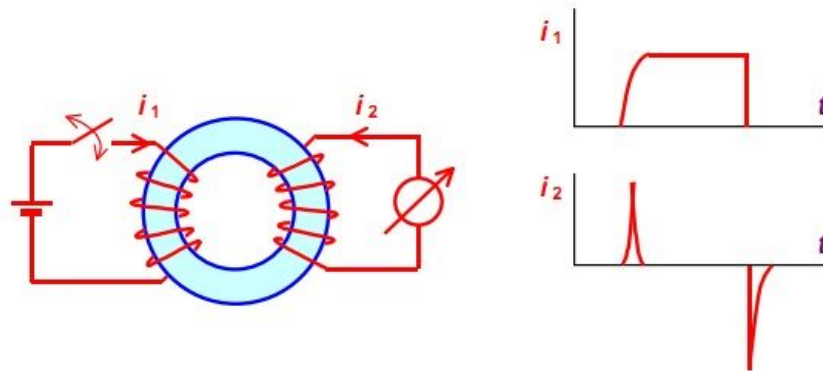


Рис. 4. Принцип устройства транзиентного трансформатора Майкла Фарадея.  $i_1$  первичный ток,  $i_2$  вторичный ток,  $t$  время

# Рабочий режим трансформаторов

Различают несколько режимов работы трансформаторов:

- Номинальный режим, т.е. режим при номинальных значениях напряжения и тока первичной обмотки трансформатора.
- Рабочий режим, при котором напряжение первичной обмотки близко к номинальному или равно ему, а ток определяется нагрузкой трансформатора.
- Режим холостого хода, т.е. режим ненагруженного трансформатора, при котором цепь вторичной обмотки разомкнута (или подключена к нагрузке с очень большим сопротивлением (например, вольтметр)).
- Режим короткого замыкания трансформатора, при котором его вторичная обмотка замкнута накоротко (или подключена к нагрузке с очень малым сопротивлением (например, амперметр)).

Режим холостого хода и короткого замыкания возникают при авариях. Эти режимы могут создаваться специально для испытания трансформаторов на заводах изготовителях в опытах холостого хода и короткого замыкания.



## *Опыт холостого хода трансформатора*

Опытом холостого хода называют испытание трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном напряжении на первичной обмотке. Схема для проведения опыта холостого хода приведена на рис.11.1. Полагая, что измерительные приборы не вносят в режим работы трансформатора сколько-нибудь ощутимых изменений, получаем возможность измерить ряд его параметров, а затем дополнить это ряд расчетами.

Мощность потерь в трансформаторе при холостом ходе складывается из мощности потерь в магнитопроводе -  $P_c$  и в проводах -  $P_{пр}$ . Мощность потерь в магнитопроводе пропорциональна квадрату магнитной индукции -  $B^2$ .

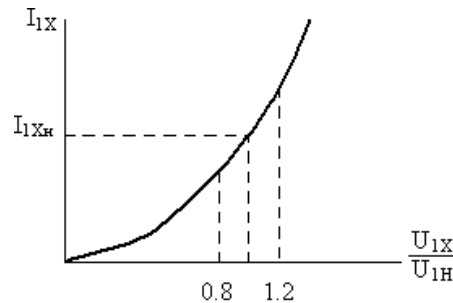


Рис. 11.2

Рис.5. характеристика холостого хода трансформатора

# Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора определяет зависимость напряжения вторичной обмотки  $U_2$  от тока вторичной обмотки  $I_2$  при постоянном коэффициенте мощности  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  и номинальном напряжении первичной обмотки  $U_1$ . Часто для определения внешней характеристики пользуются относительными единицами

*Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции в магнетизме.*

Био и Савар провели в 1820 г. исследование магнитных полей токов различной формы. Они установили, что магнитная индукция во всех случаях пропорциональна силе тока, создающего магнитное поле. Лаплас проанализировал экспериментальные данные, полученные Био и Саваром, и нашел, что магнитное поле тока  $I$  любой конфигурации может быть вычислено как векторная сумма (суперпозиция) полей, создаваемых отдельными элементарными участками тока.

Таким образом, ордината внешней характеристики определяется выражением:

$$\frac{U_2}{n_{21} * U_{1H}} = 1 - K_3 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} (R_{\pi} * \cos\varphi_2 + X_k * \sin\varphi_2)$$

где  $K_3 = I_1 \setminus I_{1H}$

Выражение показывает, что напряжение на выходе трансформатора зависит от его внутреннего сопротивления ( $R_k$ ,  $X_k$ ), коэффициент мощности  $\cos \varphi_2$  и коэффициент загрузки, т.е. график представляет наклонную линию. Трансформаторы проектируют так, чтобы при номинальном токе вторичной обмотки снижение выходного напряжения не превышало 5, 10% от номинального.

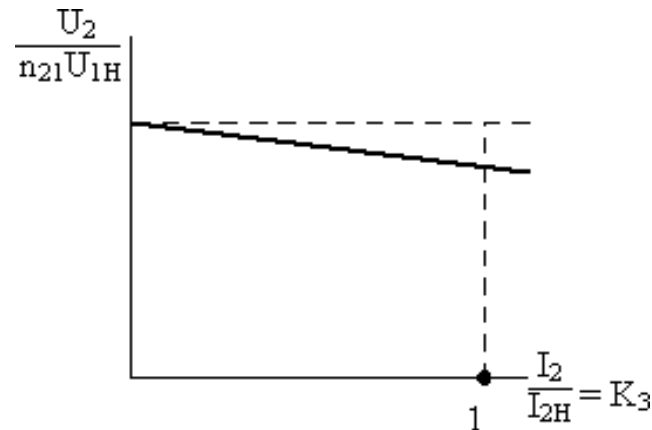


Рис. 11.6  
Рисунок 7.

## Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия (КПД) трансформатора определяется отношением активной мощности  $P_2$  на выходе трансформатора к активной мощности  $P_1$  на его входе  $\eta = P_2 / P_1$

Мощные современные трансформаторы могут иметь КПД больше 99%. В таких случаях мощности  $P_2$  и  $P_1$  настолько близки, что не существует измерительных приборов, способных их отличить. Поэтому КПД определяют косвенным методом, основанном на прямом измерении мощности  $P_2$  и мощности потерь  $D_P$ .

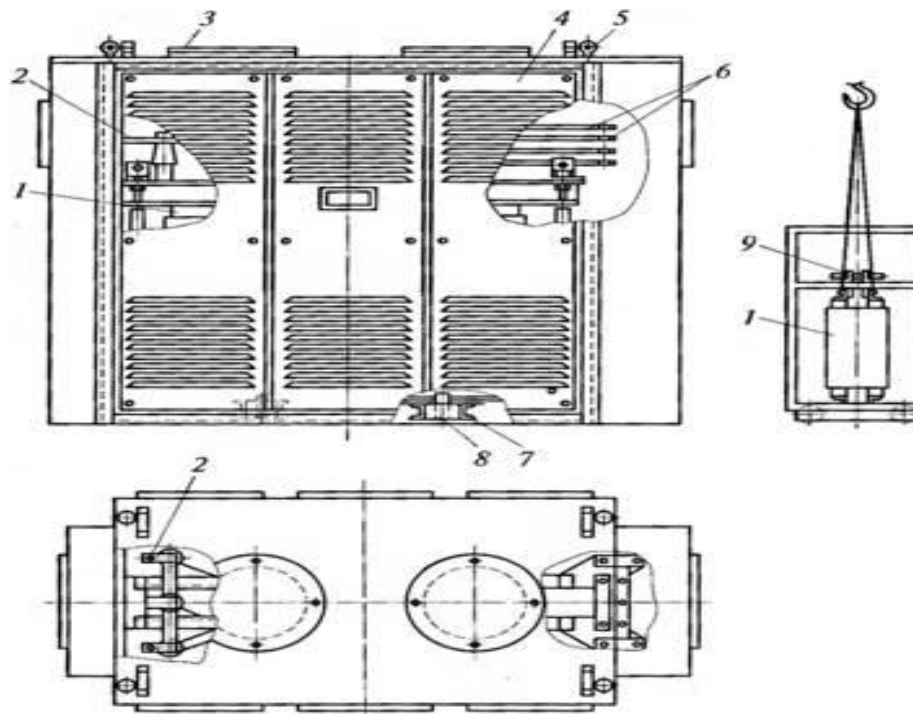
Мощность потерь в трансформаторе равна сумме мощностей потерь в магнитопроводе -  $P_C$  и в проводах  $P_{пр}$ . Потери в магнитопроводе пропорциональны напряжению первичной обмотки  $U_1$ . Обычно трансформаторы работают при номинальном напряжении первичной обмотки. Поэтому считают  $P_C = \text{const}$ . Их определяют в опыте холостого хода.

# Силовые трансформаторы

- Силовые трансформаторы подразделяют на сухие (рис. 1), устанавливаемые в помещениях с пожаро- и взрывоопасной средой, масляные для наружной и внутренней установки в неопасной с точки зрения пожара и взрыва среде и трансформаторы с заполнением негорючим жидким диэлектриком (совтолом), устанавливаемые в закрытых помещениях повышенной пожароопасности.
- Основными частями масляного трансформатора (рис. 2) являются магнитопровод и жестко закрепленные на нем обмотки. Для защиты от воздействий окружающей среды они помещены в стальной бак 1. Бак герметически закрыт крышкой 6. Сквозь крышку с помощью проходных изоляторов (вводов) 7 — 9 электрические цепи обмоток ВН выведены наружу. Над крышкой расположен расширитель 12, сообщающийся трубопроводом с баком. В разрез этого трубопровода установлено газовое реле 11.

Непосредственно из бака наружу через крышку выведена выхлопная труба 10, нормально закрытая мембраной.

Труба предназначена для аварийных выбросов газов и масла наружу. На крышке смонтирована рукоятка 4 переключателя напряжения. Переключатель напряжения 16 расположен под крышкой и соединен с рукояткой валом, проходящим сквозь крышку в сальниковом уплотнении. Контакты переключателя можно электрически соединить с теми или иными регулировочными отводами 18 обмоток ВН 77. Крышка сквозными подъемными шпильками соединена с магнитопроводом, установленным на дно бака. Наружная резьбовая часть подъемных шпилек предназначена для наворачивания съемных грузовых колец (рымов). При работе трансформатор нагревается, так как в проводниках обмоток и в стали магнитопровода происходят потери энергии. Для интенсивного удаления избытка теплоты внутренний объем

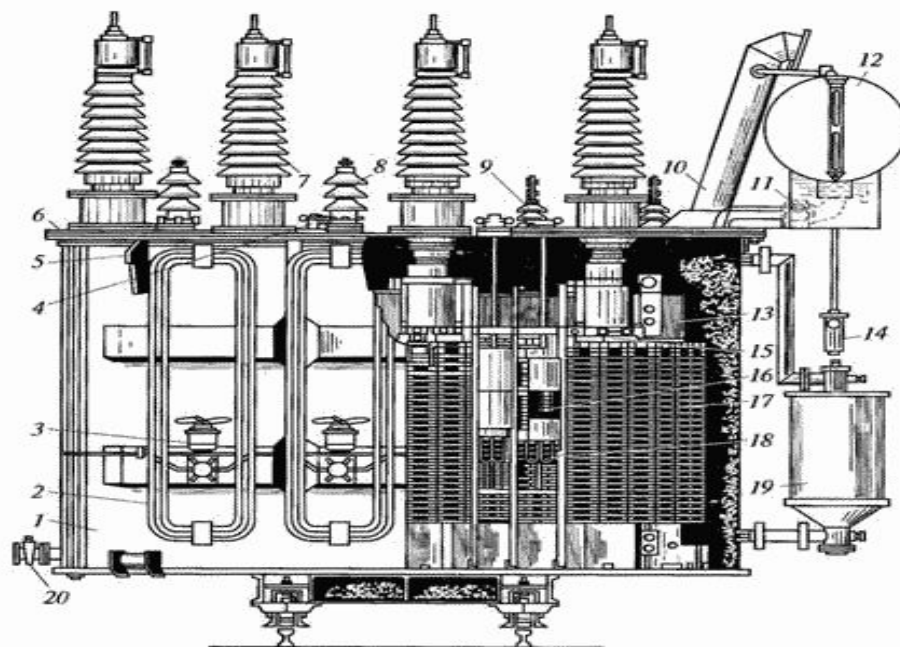


□ **Рис. 8. Силовой трансформатор ТС:**

1 — активная часть; 2 — ввод ВН; 3 — крышка люка; 4 — кожух; 5 — кольцо для подъема трансформатора; 6 — шины НИ; 7 — тележка; 8 — каток; 9 — планка для подъема активной части

бака заполнен специальным минеральным маслом. При этом часть масла находится в расширителе, что исключает наличие воздушных пузырей под крышкой. Этому способствует небольшой уклон крышки в сторону, противоположную расширителю.

О типе трансформатора и его системе охлаждения можно судить по маркировке трансформатора. Первая буква соответствует числу фаз: Т — трехфазный, О — однофазный. Если за первой буквой идет буква Р, это указывает на расщепление вторичной обмотки; при отсутствии расщепления буква Р опускается. Далее идут одна или две буквы, указывающие способ охлаждения трансформатора: М — естественное масляное, Н — негорючее диэлектрическое, С — воздушное в сухом трансформаторе; Д — с дутьем. После этих букв в марках трехобмоточных трансформаторов ставят букву Т — трехобмоточный; в марках двухобмоточных трансформаторов эта буква опускается. Затем ставят букву Н, если трансформатор имеет устройство регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).



**Рис. 9. Трансформатор типа ТДТГ-16000/110:**

1 — бак; 2 — трубчатый радиатор; 3 — электровентиль; 4 — рукоятка переключателя напряжения; 5 — ребро жесткости; 6 — крышка; 7-9 — проходные изоляторы; 10 — выхлопная труба; 11 — газовое реле; 12 — расширитель; 13 — ярмо магнитопровода; 14 — осушитель воздуха; 15 — отвод обмотки ВН; 16 — переключатель напряжения; 17 — обмотка ВН; 18 — регулировочные отводы; 19 — термосифонный фильтр; 20 — силовой кран

После букв идут цифры: в числителе указывается мощность (в  $\text{kV} \cdot \text{A}$ ), в знаменателе — номинальное напряжение обмотки высшего напряжения (в  $\text{kV}$ ). Через дефис двумя цифрами указывают год начала выпуска трансформаторов данной конструкции. Например, марка ТРМН-40000/110-91 означает: трехфазный трансформатор с расщепленной обмоткой, с естественным масляным охлаждением, имеет РПН, мощность трансформатора 40 МВ-А, напряжение (высшее) 110  $\text{kV}$ , конструкция 1991 г.



# Автотрансформаторы

- Автотрансформаторы маркируют по тому же принципу, но самой первой в марке ставят букву А.

Исполнения трансформаторов, предназначенных для работы в определенных климатических районах, обозначают буквами У, ХЛ, Т (для умеренного, холодного, тропического климата).

По категории размещения при эксплуатации различают следующие исполнения трансформаторов: 1 и 2 (для установки на открытом воздухе и в помещениях, где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от окружающей среды), 3 и 4 (для установки в закрытых помещениях с естественной вентиляцией, где колебания температуры и влажности значительно меньше, чем на открытом воздухе, и с искусственно регулируемые климатическими условиями); 5 (для установки в помещениях с повышенной влажностью).

В качестве примера рассмотрим, как расшифровываются следующие обозначения трансформаторов:

ТМ-100/10-97У1 — трехфазный двухобмоточный трансформатор с естественным масляным охлаждением; номинальная мощность 100 кВ·А; класс напряжения 10 кВ; конструкция 1997 г.; для районов с умеренным климатом; для установки на открытом воздухе;

ТСЗ-100/10-95УЗ — трехфазный сухой (С) трансформатор защищенного (З) исполнения, номинальная мощность 100 кВ · А, класс напряжения 10 кВ, конструкция 1995 г., для районов с умеренным климатом; для установки в закрытых помещениях с естественной вентиляцией;

ТРДНС-40000/35-84Т1 — трехфазный двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой НИ, с принудительной циркуляцией воздуха в системе охлаждения, с РПН, для собственных (С) нужд электростанций, номинальная мощность 40 МВ А; класс напряжения 35 кВ; конструкция 1984 г.; тропическое исполнение, для установки на открытом воздухе;

АТДЦНТ-125000/220/110-98У1 — трехфазный трехобмоточный автотрансформатор с принудительной циркуляцией масла (Ц) и воздуха в системе охлаждения, с РПН; номинальная мощность 125 МВ А, с обмотками ВН 220 кВ и среднего напряжения (СН) 110 кВ; конструкция 1998 г.; для районов с умеренным климатом; для установки на открытом воздухе;

ТЦ-250000/500-96ХЛ1 — трехфазный двухобмоточный трансформатор с принудительной циркуляцией масла (Ц) и воды в системе охлаждения; номинальная мощность 250 МВ-А; класс напряжения 500 кВ; конструкция 1996 г.; для районов с холодным климатом, для установки на открытом воздухе.

Обмотки трансформаторов обычно соединяют по схемам звезда (Y), звезда с выведенной нейтралью (YN), треугольник (A).

С 1992 г. электротехническая промышленность России изготавливает масляные трансформаторы I и II габаритов (мощность до 630 кВА, класс напряжения до 35 кВ) типов ТМГ и ТМВГ новой серии. Отличительной особенностью этих трансформаторов является разъемная герметизированная конструкция бака, позволяющая исключить контакт внутреннего объема трансформатора с окружающей средой. Эти трансформаторы полностью, до крышки, заполнены трансформаторным маслом, и температурные колебания его объема компенсируются за счет изменения объема бака с гофрированными стенками. Трансформаторы заполняют дегазированным маслом под глубоким вакуумом.

В зависимости от типа трансформатора бак изготавливают овальной или треугольной формы. Он состоит из верхней уголковой рамы, гофрированной стенки из тонкой листовой стали и нижней обечайки с приваренным дном. Из конструкции бака исключены маслорасширитель, термосифонный и воздушный фильтры и радиаторы охлаждения. Герметичное исполнение и применение гофрированных стенок бака позволяют существенно снизить массу и габариты трансформатора. Срок службы трансформаторов составляет 25 лет при сокращенном объеме текущего ремонта и без проведения капитальных ремонтов. Однако трансформаторы типов ТМГ и ТМВГ требуют более высокого уровня монтажа и эксплуатации. Стенки бака, выполненные из тонколистовой стали, чувствительны к механическим воздействиям, поэтому монтажный и эксплуатационный персонал должен соблюдать повышенную осторожность при транспортировании, монтаже и текущих ремонтах герметизированных трансформаторов.

С 2000 г. внедряется новая серия трансформаторов напряжением 35 кВ мощностью 1000... 6300 кВ А. Масса трансформаторов новой серии и потери холостого хода снижены в среднем на 20 %. В энергосистемах, а также на предприятиях в большинстве случаев применяют трехфазные трансформаторы. Группа из трех однофазных трансформаторов стоит дороже и требует приблизительно на 20 % больше меди и стали, чем один трехфазный трансформатор той же мощности. Поэтому однофазные трансформаторы устанавливают лишь в тех случаях, когда по условиям транспортирования нельзя применять трехфазные, а также при отсутствии трехфазных трансформаторов требуемой мощности. Нагрев трансформаторов ограничивается допустимым превышением температуры обмотки (65 °С), магнитопровода (75 °С) и верхних слоев масла (55 °С) над температурой охлаждающего воздуха (20 °С). В процессе эксплуатации трансформаторов их нагрузка, а следовательно, и нагрев изменяются в значительных пределах.

В период недогрузки трансформатор недоиспользуется. Поэтому при сохранении расчетного срока службы 25 лет разрешается перегружать трансформаторы, когда это требуется. На каждые 3 % недогрузки допускается на такое же время перегрузка трансформатора на 1 %; кроме того, на 1 % недогрузки трансформатора летом разрешается 1 % перегрузки в зимнее время. Это нормальная систематическая перегрузка, которая в общей сложности не должна превышать 30 % для масляных и совтоловых и 20 % для сухих трансформаторов. В аварийных условиях, когда отключился один из двух трансформаторов, разрешается перегрузка оставшегося в работе трансформатора на 40 % выше номинальной мощности продолжительностью до 6 ч ежедневно в течение 5 сут.

Автотрансформаторы имеют две электрически связанные соединенные в звезду обмотки с общей заземленной нейтралью и третью, соединенную в треугольник и имеющую с двумя другими обмотками только электромагнитную связь.

Наличие обмотки, соединенной в треугольник, приводит к компенсации электродвижущей силы (ЭДС) третьей гармоники и других гармоник кратных трем, а также к уменьшению сопротивления нулевой последовательности в сети с заземленной нейтралью. Это важно для повышения чувствительности релейной защиты и плавких предохранителей в сетях.

Область применения силовых автотрансформаторов в системах электроснабжения — связь двух электрических сетей высокого напряжения. Для этого используются две электрически связанные соединенные в звезду обмотки. К третьей обмотке подключаются генераторы, трансформаторы собственных нужд электростанций или синхронные компенсаторы и статические конденсаторы районных подстанций, либо же она не имеет присоединений.