

Электрические трансформаторы

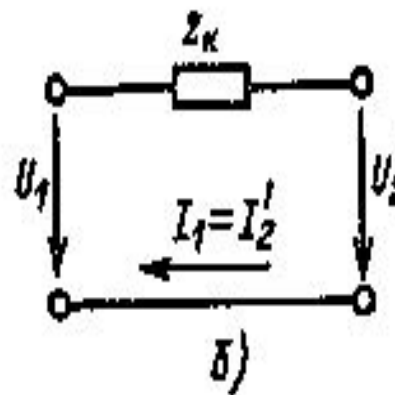
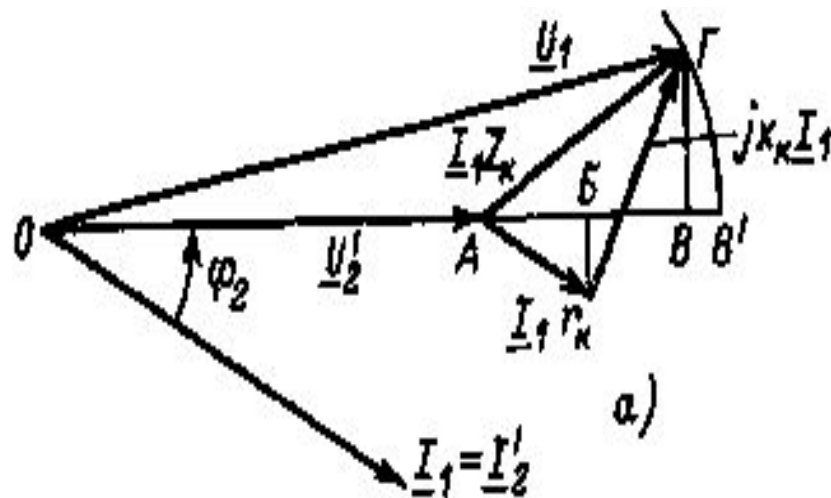


Эксплуатация трансформаторов

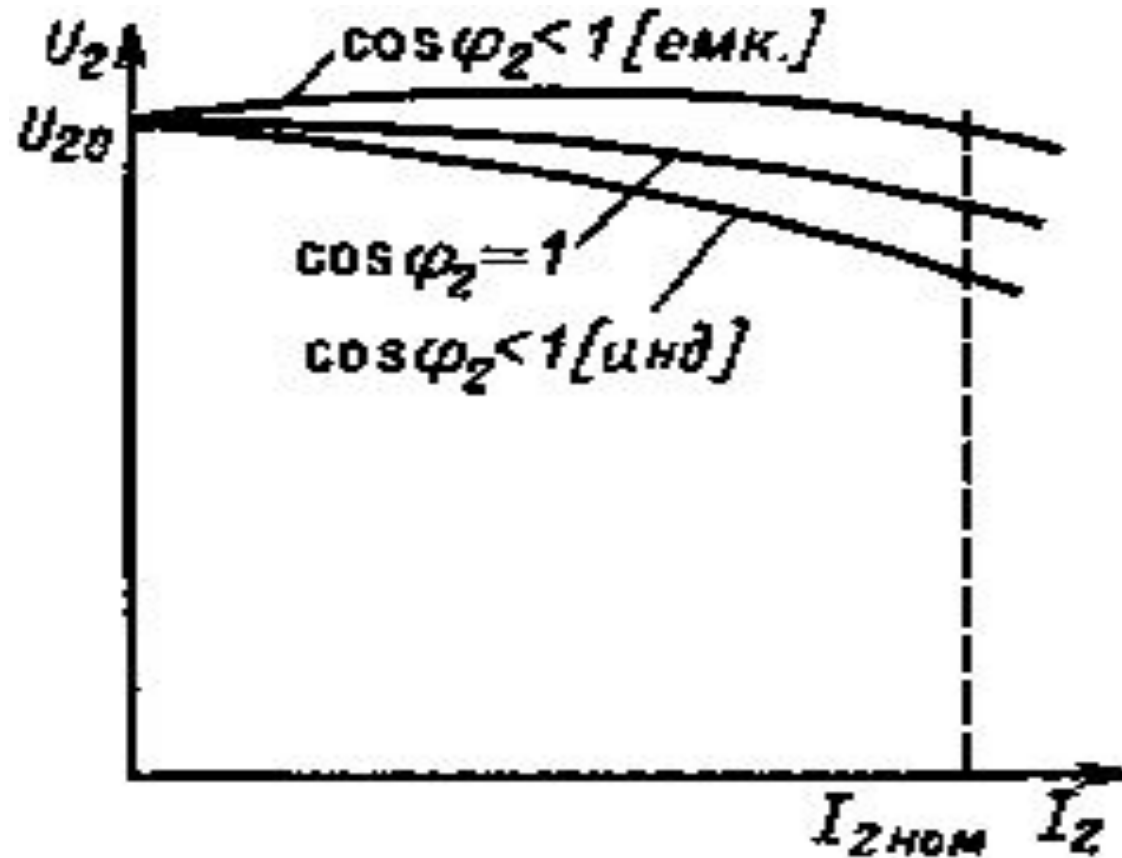
ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА

- Зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от тока нагрузки $\underline{U}_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ называется **внешней характеристикой**.
- С изменением тока во вторичной обмотке (тока нагрузки I_2) напряжение на вторичной обмотке изменяется.
- Значение напряжения на вторичной обмотке определяется не падением напряжения, а потерей напряжения в обмотках.
- Потеря напряжения есть арифметическая разность между первичным и приведенным вторичным напряжением:

$$\Delta U'_2 = U_1 - U'_2$$

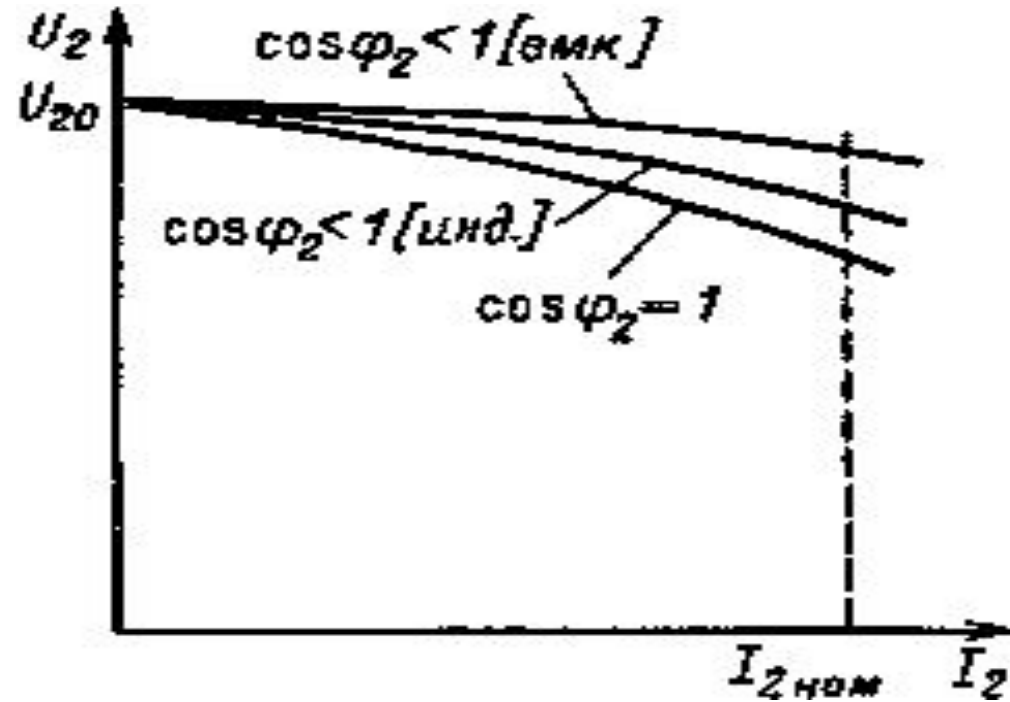


Внешние характеристики трансформаторов средней и большой мощности



- Изменение напряжения U_2 во многом зависит не только от значений z_k , $\cos \varphi_2$, но и от соотношения значений r_k и x_k .
- У трансформаторов средней и большой мощности z_k мало и $x_k > r_k$.

Внешние характеристики трансформатора малой мощности

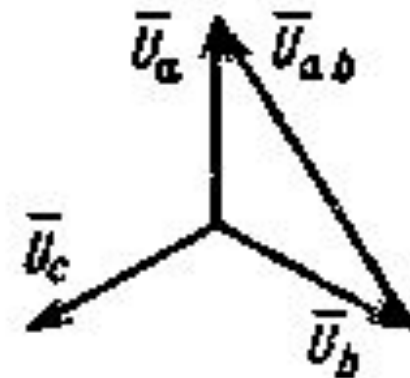
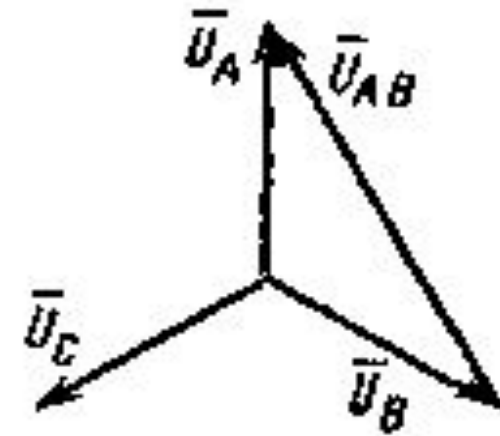
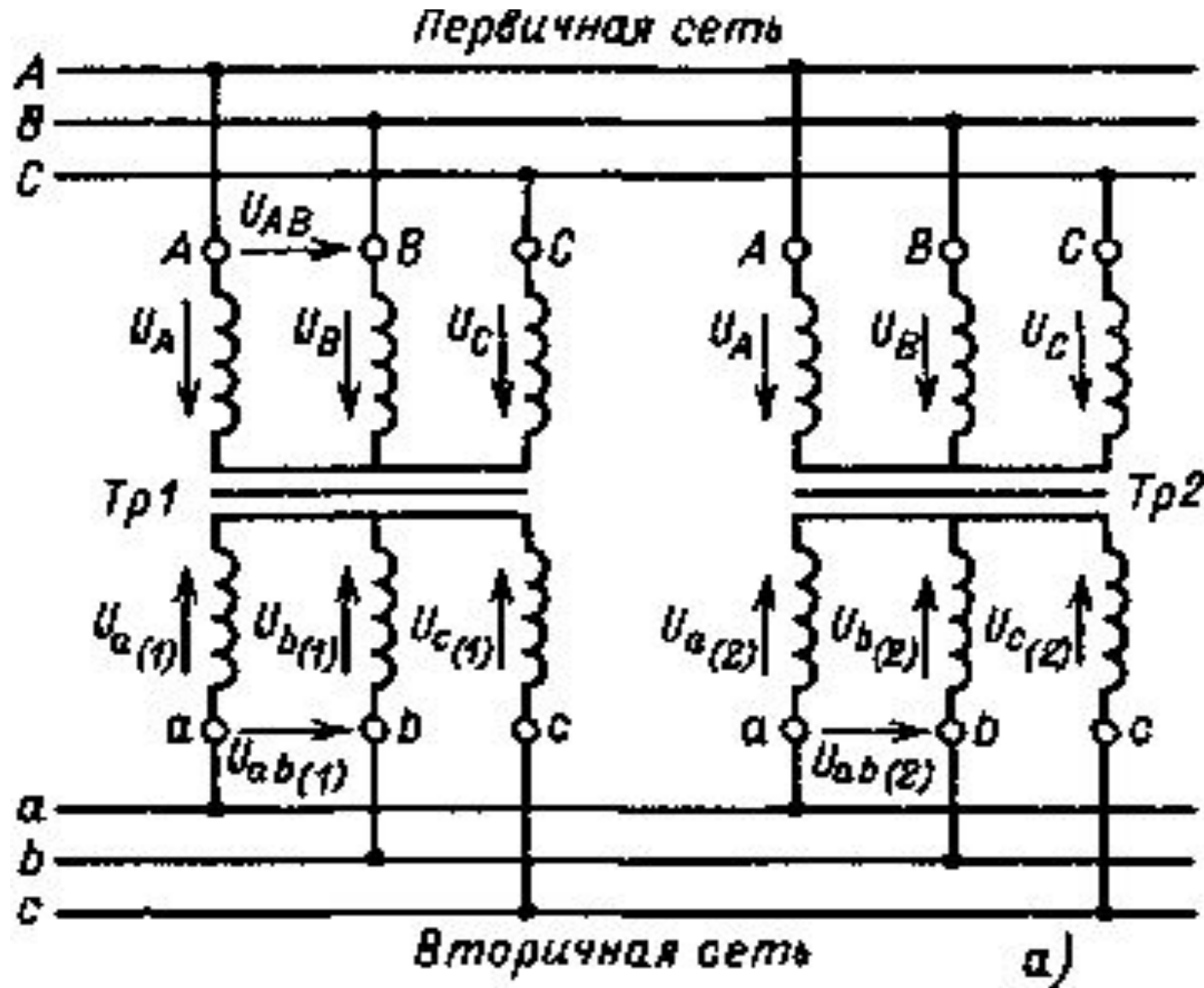


- У трансформаторов малой мощности r_k относительно велико и $r_k > x_k$.
- Поэтому изменение напряжения у них более значительное и взаимное расположение внешних характеристик при различных значениях коэффициента мощности потребителей существенно отличается от трансформаторов большой мощности.

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

- Для преобразования электрической энергии высокого напряжения на территории отдельных промышленных предприятий, цехов или рядом с ними устанавливаются трансформаторы, понижающие напряжение до 220, 380 или 660 В, при котором работают большинство потребителей.
- С целью сокращения длины проводов низковольтных сетей, а они имеют значительное сечение, и бесперебойного снабжения электроэнергией приемников целесообразно устанавливать не один трансформатор на один цех или промышленное предприятие, а несколько и включить их параллельно.
- При аварийном выходе из строя или профилактическом ремонте одного из них остальные обеспечат электроэнергией приемники.
- С той же целью бесперебойного снабжения промышленных предприятий на электрических станциях устанавливаются несколько трансформаторов, включенных параллельно.

Параллельное соединение трехфазных трансформаторов



б)

Условия включения трансформаторов на параллельную работу

- 1. **Соответствие фазировки двух трансформаторов.**
- При несоблюдении этого условия, и включении их на одни шины произойдет междофазное короткое замыкание.
- 2. **Равенство первичных и вторичных напряжений**, т.к. нельзя включить трансформатор на напряжение, которое не соответствует его классу изоляции.
- 3. **Равенство коэффициентов трансформации**, разница между ними должна быть в диапазоне $\pm 0,5\%$.
- 4. **Равенство напряжений короткого замыкания.**
- Напряжение короткого замыкания характеризует потери в обмотках трансформатора. Чем выше $U_{кз}$, тем больше сопротивление обмотки.
- Соответственно, трансформатор, имеющий меньшее $U_{кз}$, будет “брать” на себя больше нагрузку и работать с постоянным перегрузом. Максимальное допустимое различие этих показателей, также регламентированное ПТЭЭП) - не более 10%.
- 5. **Одинаковые группы соединения обмоток.**
- Его невыполнение приведет к появлению уравнивающих токов, так как фазы будут сдвинуты на определенный угол.
- **Соотношение мощностей**, параллельно подключаемых трансформаторов, *должно различаться не более чем в три раза.*
- В противном случае, менее мощный трансформатор будет работать с перегрузом.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- При функционировании силового трансформатора, необходимо непрерывно контролировать состояние его параметров:

□ *величина нагрузки;*

□ *напряжение;*

□ *температура;*

□ *состояние изоляции и масла.*

- Работа электрооборудования допускается лишь в том случае, если эти характеристики остаются в пределах нормы.
- В трансформаторах с газовым реле крышка бака устанавливается таким образом, что бы она имела незначительный подъем (не менее 1 градуса) в направлении газового реле.
- Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов так же требуют, что бы маслопровод был расположен к расширителю под уклоном не меньшим, чем 2 градуса.
- Уровень масла в расширителе неработающего трансформатора должен находиться на отметке, соответствующей температуре масла трансформатора в данный момент.
- Обслуживающий персонал должен вести наблюдение за температурой верхних слоев масла по термосигнализаторам и термометрам, которыми оснащаются трансформаторы с расширителем, а также за показаниями мановакуумметров у герметичных трансформаторов, для которых при повышении давления в баке выше **50 кПа** ($0,5 \text{ кгс/см}^2$) нагрузка должна быть снижена.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- Воздушная полость предохранительной трубы трансформатора (реактора) должна быть соединена с воздушной полостью расширителя.
- Уровень мембраны предохранительной трубы должен быть выше уровня расширителя.
- Мембрана выхлопной трубы при ее повреждении может быть заменена только на идентичную заводской.
- Стационарные установки пожаротушения должны находиться в состоянии готовности к применению в аварийных ситуациях и подвергаться проверкам по утвержденному графику.
- **Гравийная засыпка маслоприемников** трансформаторов (реакторов) должна содержаться в чистом состоянии и **не реже одного раза в год промываться**.
- При загрязнении гравийной засыпки (пылью, песком и т.д.) или замасливании гравия его промывка должна проводиться, как правило, весной и осенью.
- При образовании на гравийной засыпке твердых отложений от нефтепродуктов **толщиной более 3 мм**, появлении растительности или невозможности его промывки **должна осуществляться замена гравия**.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- На баках трехфазных трансформаторов наружной установки должны быть указаны подстанционные номера.
- На группах однофазных трансформаторов подстанционный номер указывается на средней фазе. На баки группы однофазных трансформаторов наносится расцветка фаз.
- На дверях трансформаторных пунктов и камер с наружной и внутренней стороны должны быть указаны подстанционные номера трансформаторов, а также с наружной стороны должны быть предупреждающие знаки.
- Двери должны быть постоянно закрыты на замок.
- Осмотр и техническое обслуживание высоко расположенных элементов трансформаторов и реакторов (более 3 м) должны выполняться со стационарных лестниц с перилами и площадками наверху с соблюдением правил безопасности.
- Включение в сеть трансформатора (реактора) должно осуществляться толчком на полное напряжение.
- Трансформаторы, работающие в блоке с генератором, могут включаться в работу вместе с генератором подъемом напряжения с нуля.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- Для каждой электроустановки в зависимости от графика нагрузки с учетом надежности питания потребителей и минимума потерь должно определяться число одновременно работающих трансформаторов.
- В распределительных электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно измерения нагрузок и напряжений трансформаторов производят в первый год эксплуатации не менее 2 раз в период максимальных и минимальных нагрузок, в дальнейшем - по необходимости.
- Резервные трансформаторы должны содержаться в состоянии постоянной готовности к включению в работу.
- Нейтрали обмоток напряжением 110 кВ трансформаторов должны работать, как правило, в режиме глухого заземления.
- Иной режим работы нейтралей трансформаторов напряжением 110 кВ и способы их защиты устанавливает энергоснабжающая организация.
- При автоматическом отключении трансформатора действием защит от внутренних повреждений трансформатор можно включать в работу только после осмотра, испытаний, анализа газа, масла и устранения выявленных дефектов (повреждений).
- В случае отключения трансформатора от защит, действие которых не связано с его внутренним повреждением, он может быть включен вновь без проверок.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- При срабатывании газового реле на сигнал должен быть произведен наружный осмотр трансформатора и отбор газа из реле для анализа и проверки на горючесть.
- Для обеспечения безопасности персонала при отборе газа из газового реле и выявления причины его срабатывания трансформатор должен быть разгружен и отключен в кратчайший срок.
- Если газ в реле негорючий и признаки повреждения трансформатора отсутствуют, а его отключение вызвало недоотпуск электроэнергии, он может быть включен в работу до выяснения причины срабатывания газового реле на сигнал.
- Продолжительность работы трансформатора в этом случае устанавливает ответственный за электрохозяйство Потребителя.
- По результатам анализа газа из газового реле, анализа масла и других измерений и испытаний необходимо установить причину срабатывания газового реле на сигнал, определить техническое состояние трансформатора и возможность его нормальной эксплуатации.
- Масло в расширителе трансформаторов (реакторов), а также в баке или расширителе устройства регулирования напряжения под нагрузкой (далее - РПН) должно быть защищено от соприкосновения с воздухом.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- У трансформаторов, оборудованных специальными устройствами, предотвращающими увлажнение масла, эти устройства должны быть постоянно включены, независимо от режима работы трансформатора.
- Трансформаторы мощностью 1000 кВ×А и более должны эксплуатироваться с системой непрерывной регенерации масла в термосифонных и адсорбных фильтрах.
- Масло маслонаполненных вводов негерметичного исполнения должно быть защищено от окисления и увлажнения.
- При необходимости отключения разъединителем (отделителем) тока холостого хода ненагруженного трансформатора, оборудованного устройством РПН, после снятия нагрузки на стороне Потребителя переключатель должен быть установлен в положение, соответствующее номинальному напряжению.
- Для масляных трансформаторов и трансформаторов с жидким негорючим диэлектриком допускается продолжительная нагрузка любой обмотки током, превышающим на 5 % номинальный ток ответвления, если напряжение не превышает номинальное напряжение соответствующего ответвления.
- Продолжительные допустимые нагрузки сухих трансформаторов устанавливаются в стандартах и технических условиях конкретных групп и типов трансформаторов.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- Для масляных и сухих трансформаторов, а также трансформаторов с жидким негорючим диэлектриком допускаются систематические перегрузки, значение и длительность которых регламентируются инструкциями заводов-изготовителей.
- В аварийных режимах допускается кратковременная перегрузка трансформаторов сверх номинального тока при всех системах охлаждения независимо от длительности и значения предшествующей нагрузки и температуры охлаждающей среды в следующих пределах:

Масляные трансформаторы:

□ перегрузка по току, %	30	45	60	75	100
□ длительность перегрузки, мин.	120	80	45	20	10

Сухие трансформаторы:

□ перегрузка по току, %	20	30	40	50	60
□ длительность перегрузки, мин.	60	45	32	18	5

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- При номинальной нагрузке трансформатора температура верхних слоев масла должна быть не выше:
 - у трансформаторов с системой масляного охлаждения с дутьем и принудительной циркуляцией масла (ДЦ) - **75 °С**;
 - с системами масляного охлаждения (М) и масляного охлаждения с дутьем (Д) - **95 °С**;
 - у трансформаторов с системой масляного охлаждения с принудительной циркуляцией масла через водоохладитель (Ц) температура масла на входе в маслоохладитель должна быть **не выше 70 °С**.
- На номинальную нагрузку включение трансформаторов допускается:
 - с системами охлаждения М и Д - при любой отрицательной температуре воздуха;
 - с системами охлаждения ДЦ и Ц - при температуре окружающего воздуха не ниже минус 25 °С.
- При более низких температурах трансформатор должен быть предварительно прогрет включением на нагрузку до 0,5 номинальной без запуска системы циркуляции масла.
- Система циркуляции масла должна быть включена в работу только после увеличения температуры верхних слоев масла до минус 25 °С.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- На трансформаторах с системой охлаждения Д электродвигатели вентиляторов должны автоматически включаться при температуре масла $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ или токе, равном номинальному, независимо от температуры масла.
- Отключение электродвигателей вентиляторов производится при снижении температуры верхних слоев масла до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, если при этом ток нагрузки менее номинального.
- Устройства регулирования напряжения под нагрузкой должны быть в работе, как правило, в автоматическом режиме.
- Их работа должна контролироваться по показаниям счетчиков числа операций.
- По решению ответственного за электрохозяйство Потребителя допускается дистанционное переключение РПН с пульта управления, если колебания напряжения в сети находятся в пределах, удовлетворяющих требования Потребителей.
- Переключения под напряжением вручную (с помощью рукоятки) не разрешаются.
- Переключающие устройства РПН трансформаторов разрешается включать в работу при температуре верхних слоев масла выше $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для наружных резисторных устройств РПН) и выше $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ - для устройств РПН с токоограничивающими реакторами, а также для переключающих устройств с контактором, расположенным на опорном изоляторе вне бака трансформатора и оборудованным устройством искусственного подогрева.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- На трансформаторах, оснащенных переключателями ответвлений обмоток без возбуждения (**ПБВ**), правильность выбора коэффициента трансформации должна проверяться *не менее 2 раз в год* - перед наступлением зимнего максимума и летнего минимума нагрузки.
- Осмотр трансформаторов без их отключения должен производиться в следующие сроки:
 - главных понижающих трансформаторов подстанций с постоянным дежурством персонала - *1 раз в сутки*;
 - остальных трансформаторов электроустановок с постоянным и без постоянного дежурства персонала - *1 раз в месяц*;
 - на трансформаторных пунктах - *не реже 1 раза в месяц*.
- В зависимости от местных условий и состояния трансформаторов указанные сроки могут быть изменены техническим руководителем (ответственным за электрохозяйство) Потребителя.
- Внеочередные осмотры трансформаторов производятся:
 - после неблагоприятных погодных воздействий (гроза, резкое изменение температуры, сильный ветер и др.);
 - при работе газовой защиты на сигнал, а также при отключении трансформатора газовой или (и) дифференциальной защитой.

Осмотры силовых трансформаторов

- При осмотрах трансформаторов проверяются:

- ☐ *показания всех измерительных приборов (термометров, термосигнализаторов, мановакуумметров и других);*
- ☐ *состояние внешней изоляции трансформатора (отсутствие трещин и сколов фарфора, степень загрязнения поверхности);*
- ☐ *состояние ошиновки, кабельных вводов и доступных для наблюдения контактных соединений;*
- ☐ *состояние фланцевых соединений маслопроводов и отсутствие течи масла;*
- ☐ *наличие и уровень масла в расширителе и маслонаполненных вводах; состояние контура заземления;*
- ☐ *состояние маслоприемных устройств (гравийной засыпки);*
- ☐ *при закрытой установке трансформаторов проверяется состояние помещения, исправность вентиляции, наличие средств пожаротушения.*

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

- Текущие ремонты трансформаторов (реактивов) производятся по мере необходимости.
- Периодичность текущих ремонтов устанавливает технический руководитель Потребителя.
- Капитальные ремонты (планово-предупредительные - по типовой номенклатуре работ) должны проводиться:
 - трансформаторов **110 кВ** и выше мощностью **125 МВА** и более не позднее чем через **12 лет** после ввода в эксплуатацию с учетом результатов диагностического контроля, в дальнейшем - по мере необходимости;
 - остальных трансформаторов - в зависимости от их состояния и результатов диагностического контроля.
- Внеочередные ремонты трансформаторов должны выполняться, если дефект в каком-либо их элементе может привести к отказу.
- Потребитель, имеющий на балансе маслонаполненное оборудование, должен хранить неснижаемый запас изоляционного масла не менее **110 % объема наиболее вместимого аппарата.**
- Периодичность отбора проб масла трансформаторов и реакторов напряжением 110 и 220 кВ для хроматографического анализа газов, растворенных в масле, должна соответствовать методическим указаниям по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле трансформаторного оборудования.

Правила технической эксплуатации силовых трансформаторов

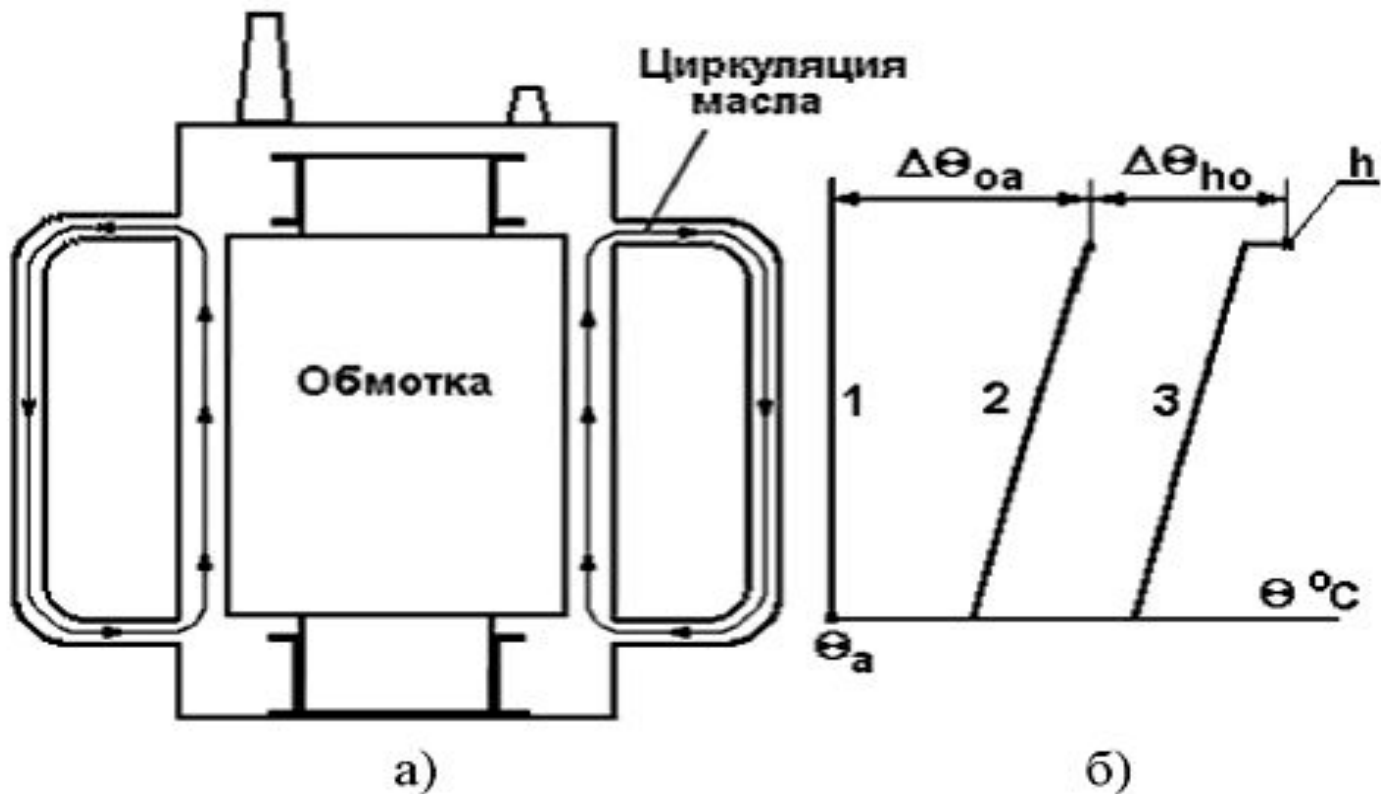
- Трансформатор должен быть аварийно выведен из работы при:
 - *сильном неравномерном шуме и потрескивании внутри трансформатора;*
 - *ненормальном и постоянно возрастающем нагреве трансформатора при нагрузке ниже номинальной и нормальной работе устройств охлаждения;*
 - *выбросе масла из расширителя или разрыве диафрагмы выхлопной трубы;*
 - *течи масла с понижением его уровня ниже уровня масломерного стекла.*
- Трансформаторы выводятся из работы также при необходимости немедленной замены масла по результатам лабораторных анализов.

Режим перегрузки трансформаторов

- Наиболее подверженным процессу старения элементом трансформатора является целлюлозная изоляция обмоток, фактически определяющая ресурс (срок службы) трансформатора.
- Основным фактором, влияющим на старение изоляции, является ее нагрев, обуславливающий термический износ изоляции.
- Существует так называемое 6-градусное правило: *увеличение температуры изоляции на 6 градусов сокращает срок ее службы вдвое.*
- Это правило справедливо в диапазоне температур 80... 140°C.
- Наиболее интенсивный нагрев изоляции обмоток происходит при перегрузке трансформаторов.
- Перегрузки, обусловленные неравномерным суточным графиком нагрузки трансформатора, называются *систематическими*.
- Перегрузки, обусловленные аварийным отключением какого-либо элемента системы электроснабжения, называются *аварийными* перегрузками.

Режим перегрузки трансформаторов

- Допустимость систематических и аварийных перегрузок трансформаторов при их эксплуатации регламентируется Руководством по нагрузке силовых масляных трансформаторов (ГОСТ 14209-97).
- При этом учитываются система охлаждения трансформатора, температура охлаждающей среды, график нагрузки трансформатора и другие факторы.



- Естественная циркуляция масла в трансформаторе (а) и тепловая диаграмма трансформатора (б)

Режим перегрузки трансформаторов

- На тепловой диаграмме трансформатора температура охлаждающего воздуха T_a принята неизменной (вертикальная прямая 1).
- Температура масла и температура витков обмотки увеличиваются практически линейно по высоте обмотки.
- Превышение температуры масла над температурой воздуха (прямая 2) в верхней части обмотки достигает величины ΔT_{oa} .
- В силу дополнительных потерь в верхней части обмотки будет находиться наиболее нагретая точка обмотки h .
- Превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла (зависимость 3) в верхней части обмотки достигает величины $\Delta T_{h\theta}$.
- Допустимость работы трансформатора в режиме перегрузки оценивается сопоставлением температуры масла в верхней части обмотки T_O и температуры наиболее нагретой точки обмотки T_h с их предельными значениями.
- Эти предельные значения для распределительных трансформаторов (мощность до 2,5 МВА и напряжение до 35 кВ) и трансформаторов средней мощности (до 100 МВА) приведены в табл.
- В табл. указаны предельные перегрузки трансформаторов, обуславливающие предельные температуры T_{omax} и T_{hmax} при температуре воздуха $T_a=20^\circ\text{C}$.

Режим перегрузки трансформаторов

	Распределительные	Средней мощности
Режим систематических перегрузок: предельная перегрузка, о.е.	1,5	1,5
предельная температура наиболее нагретой точки обмотки, <i>Thmax</i> , °C	140	140
предельная температура масла в верхних слоях, <i>T</i> , °C	105	105
Режим продолжительных аварийных перегрузок: предельная перегрузка, о.е.	1,8	1,5
предельная температура наиболее нагретой точки обмотки, <i>Thmax</i> , °C	150	140
предельная температура масла в верхних слоях, <i>T</i> , °C	115	115

Режим перегрузки трансформаторов

- Действительная температура воздуха изменяется в течение суток, сезона, года.
- При одной и той же нагрузке трансформатора увеличение температуры воздуха вызовет увеличение температуры масла и обмотки.
- Таким образом, термический износ изоляции определяется как нагрузкой трансформатора, так и температурой окружающего воздуха.
- При инженерных расчетах режимов перегрузки трансформаторов используется *эквивалентная температура* воздуха.
- Это условно постоянная температура, которая в течение рассматриваемого периода времени вызывает такой же износ изоляции, как и действительная изменяющаяся температура за тот же период времени.

Эксплуатация трансформаторного масла

Трансформаторное масло выполняет в трансформаторе три основные функции:

- изолирует находящиеся под напряжением узлы активной части;*
- охлаждает нагревающиеся при работе узлы активной части;*
- предохраняет твердую изоляцию обмоток от увлажнения.*

- Эксплуатационные свойства масла и его качество определяются химическим составом масла.
- Вновь поступившее масло должно иметь сертификат предприятия-поставщика, подтверждающий соответствие масла стандарту.
- Для масла, прибывшего вместе с трансформатором, соответствие стандарту подтверждается записью в паспорте трансформатора.
- При каждом осмотре трансформаторов проверяется температура верхних слоев масла, контролируемая по термометрам или термосигнализаторам.
- Эта температура не должна превышать 95°С. В противном случае нагрузка трансформатора должна быть снижена.

Эксплуатация трансформаторного масла

- Состояние масла оценивается по результатам испытаний, которые в зависимости от объема делятся на три вида.
- 1. **Испытания на электрическую прочность.** Здесь определяется пробивное напряжение масла $U_{пр}$, визуально (качественно) определяется содержание механических примесей и влаги.
- *Масло заливается в маслопробойник и отстаивается в течение 20 минут для удаления из него воздушных включений. Напряжение на электродах маслопробойника плавно повышается до пробоя масла. С интервалом 10 мин. выполняются шесть пробоев. Первый пробой не учитывается, а среднее арифметическое пяти других пробоев принимается за пробивное напряжение масла.*
- Снижение пробивного напряжения свидетельствует об увлажнении масла, наличии в нем растворенного воздуха, загрязнении масла волокнами от твердой изоляции и другими примесями.
- 2. **Сокращенный анализ масла.** Дополнительно к п.1 определяются *температура вспышки масла и кислотное число.*
- Температура вспышки паров масла в закрытом тигле характеризует фракционный состав масла и служит для обнаружения в трансформаторе процессов разложения масла.

Эксплуатация трансформаторного масла

- **Кислотное число** - это количество едкого кали (KOH), выраженное в мг и необходимое для нейтрализации кислот, содержащихся в 1 г масла. Старение масла сопровождается увеличением в нем содержания кислотных соединений, поэтому кислотное число характеризует степень старения масла.
- **3. Полный анализ масла.** Дополнительно к п.2 определяются, количественное определение влаги и механических примесей, тангенс угла диэлектрических потерь, содержание водорастворимых кислот и щелочей, содержание антиокислительных присадок, температура застывания, газосодержание и другие показатели.
- Величина диэлектрических потерь характеризует степень загрязнения и старения масла.
- Влагосодержание тщательно контролируется при эксплуатации трансформаторного масла.
- Ухудшение этого показателя характеризует нарушение герметичности трансформатора или его работу в недопустимом нагрузочном режиме.
- В последнем случае происходит интенсивное старение целлюлозной изоляции и выделение ею влаги под воздействием повышенной температуры.
- Кроме того, масло содержит химически связанную воду, которая может выделяться в виде свободной воды в результате старения масла и под воздействием повышенной температуры.

Эксплуатация трансформаторного масла

- Увеличение газосодержания (кислорода воздуха) приводит к интенсификации окислительных процессов в масле. Этот показатель косвенно характеризует и герметичность трансформатора.
- Температура застывания актуальна для масла, эксплуатируемого в районах крайнего севера.
- Различают масло свежее, регенерированное (восстановленное) и эксплуатационное.
- Характеристики свежего и регенерированного масла практически не отличаются.
- Для эксплуатационного масла установлены нормально допустимые и предельно допустимые показатели качества.
- **Нормально допустимые** показатели гарантируют нормальную работу оборудования.
- При показателях масла, приближающихся к **предельно допустимым**, необходимо принять меры по восстановлению эксплуатационных свойств масла или провести его замену.
- Для определения показателей масла берется его проба в сухую, чистую, стеклянную емкость вместимостью около **1 л** с притертой стеклянной пробкой.
- Масло берется из нижних слоев через специальный сливной кран.
- Предварительно сливается некоторое количество масла (**2...3 л**) для ополаскивания стеклянной емкости.
- На емкости должна быть этикетка с указанием оборудования, из которого взята проба, даты, причины отбора пробы и фамилии лица, отобравшего пробу масла.

Эксплуатация трансформаторного масла

- Сложности эксплуатации трансформаторного масла: защита от окружающей среды, периодический контроль состояния, испытания, регенерация - обусловили широкое использование в распределительных сетях 6...35 кВ трансформаторов герметичного исполнения (ТМГ), изготавливаемых с номинальной мощностью до 1600 кВ*А.
- Эти трансформаторы полностью заполнены маслом и не имеют расширителя.
- Температурные изменения объема масла воспринимаются гофрированным баком.
- В трансформаторах ТМГ контакт масла с окружающей средой полностью отсутствует, что исключает его увлажнение, окисление и шламообразование.
- Масло практически не меняет своих свойств в течение всего срока службы трансформатора.
- Поэтому при эксплуатации таких трансформаторов отсутствует необходимость периодического взятия проб и испытаний масла.
- В настоящее время альтернативой трансформаторному маслу являются жидкие диэлектрики Midel 7131, Софексил ТСЖ и другие.
- Экологически чистый диэлектрик Midel 7131 (пробивное напряжение 55 кВ, кислотное число 0,02 мг КОН/г, температура вспышки 257°С) применяется там, где требуется высокая пожаробезопасность - в жилых, служебных, некоторых производственных помещениях.

Эксплуатация трансформаторного масла

- Для улучшения свойств трансформаторного масла российский производитель трансформаторов ОАО "Уралэлектротяжмаш" использует смесь из минерального трансформаторного масла и Midel 7131.
- Этой фирмой изготавливаются трансформаторы, полностью заполненные Midel 7131.
- Экологически чистый диэлектрик Софексил ТСЖ (пробивное напряжение 35 кВ, температура вспышки 300°C) является пожаробезопасным.
- В условиях сурового российского климата явным преимуществом Софексил ТСЖ является низкая температура застывания -75°C.
- Температура застывания стандартного трансформаторного масла -45°C.
- Недостаточно низкая температура застывания масла может привести к перегреву и повреждению трансформатора при его запуске в суровых климатических условиях (Сибирь, районы крайнего Севера).
- Трансформаторы с экологически чистыми жидкими диэлектриками дороже традиционных масляных трансформаторов, но дешевле сухих трансформаторов и успешно конкурируют с последними в части пожарной безопасности в распределительных сетях 6...35 кВ.

Хроматографический анализ газов

- Необходимость контроля за изменением состава масла в процессе эксплуатации трансформаторов ставит вопрос о выборе такого аналитического метода, который смог бы обеспечить надежное качественное и количественное определение содержащихся в трансформаторном масле соединений.
- В наибольшей степени этим требованиям отвечает хроматография, представляющая собой комплексный метод, объединивший стадию разделения сложных смесей на отдельные компоненты и стадию их количественного определения.
- По результатам этих анализов проводится оценка состояния маслонаполненного оборудования.
- Хроматографический анализ газов, растворенных в масле, позволяет выявить дефекты трансформатора на ранней стадии их развития, предполагаемый характер дефекта и степень имеющегося повреждения.
- Состояние трансформатора оценивается сопоставлением полученных при анализе количественных данных с граничными значениями концентрации газов и по скорости роста концентрации газов в масле.
- Этот анализ для трансформаторов напряжением 110 кВ и выше должен осуществляться **не реже 1 раза в 6 месяцев.**

Хроматографический анализ газов

- Основными газами, характеризующими определенные виды дефектов в трансформаторе, являются: *водород H_2 , ацетилен C_2H_2 , этан C_2H_6 , метан CH_4 , этилен C_2H_4 , окись CO и двуокись CO_2 углерода.*

- **водород** характеризует дефекты электрического характера (частичные, искровые и дуговые разряды в масле);
- **ацетилен** - перегрев активных элементов;
- **этан** - термический нагрев масла и твердой изоляции обмоток в диапазоне температур до 300°С;
- **этилен** - высокотемпературный нагрев масла и твердой изоляции обмоток выше 300°С;
- **окись и двуокись углерода** - перегрев и разряды в твердой изоляции обмоток.

- С помощью анализа количества и соотношения этих газов в трансформаторном масле можно обнаружить следующие дефекты в трансформаторе.
- 1. *Перегревы токоведущих частей и элементов конструкции магнитопровода.*
- Основные газы: этилен или ацетилен. Характерные газы: водород, метан и этан. Если дефектом затронута твердая изоляция, заметно возрастают концентрации окиси и двуокиси водорода.

Хроматографический анализ газов

- Перегрев токоведущих частей может определяться: выгоранием контактов переключающих устройств; ослаблением крепления электростатического экрана; ослаблением и нагревом контактных соединений отводов обмотки низкого напряжения или шпильки проходного изолятора ввода; лопнувшей пайкой элементов обмотки; замыканием проводников обмотки и другими дефектами.
- Перегрев элементов конструкции магнитопровода может определяться: неудовлетворительной изоляцией листов электротехнической стали; нарушением изоляции стяжных шпилек, ярмовых балок с образованием короткозамкнутого контура; общим нагревом и недопустимыми местными нагревами от магнитных полей рассеяния в ярмовых балках, бандажах, прессующих кольцах; неправильным заземлением магнитопровода и другими дефектами.
- 2. *Дефекты твердой изоляции.* Эти дефекты могут быть вызваны перегревом изоляции от токоведущих частей и электрическими разрядами в изоляции.
- При перегреве изоляции от токоведущих частей основными газами являются **окись и двуокись углерода, их отношение CO_2/CO , как правило, больше 13**; характерными газами с малым содержанием являются водород, метан, этилен и этан; ацетилен, как правило, отсутствует.
- При разрядах в твердой изоляции основными газами являются ацетилен и водород, а характерными газами любого содержания - метан и этилен.
- При этом отношение CO_2/CO , как правило, меньше 5.

Хроматографический анализ газов

- 3. *Электрические разряды в масле.* Это частичные, искровые и дуговые разряды. При частичных разрядах основным газом является водород; характерными газами с малым содержанием - метан и этилен. При искровых и дуговых разрядах основными газами являются водород и ацетилен; характерными газами с любым содержанием - метан и этилен.
- После выявления дефекта и его подтверждения не менее чем двумя-тремя последующими измерениями следует планировать вывод трансформатора из работы прежде всего с дефектами группы 2.
- Чем раньше выведен из работы трансформатор с развивающимся дефектом, тем меньше риск его аварийного повреждения и объем ремонтных работ.
- Если по результатам диагностики трансформатор должен быть выведен из работы, но по каким-то объективным причинам это невозможно осуществить, его следует оставить на контроле с учащенным отбором проб масла и хроматографическим анализом газов.
- Хроматографический анализ газов, растворенных в масле, позволяет выявлять не только развивающиеся дефекты в трансформаторе, но и общее состояние изоляции его обмоток.
- Метод жидкостной хроматографии позволяет определять и контролировать требуемое содержание в трансформаторном масле антиокислительных присадок, защищающих масло и другие изоляционные материалы трансформатора от старения.

Испытания трансформаторов после капитального ремонта

- При эксплуатации наиболее полные измерения и испытания трансформатора проводятся после выполнения его капитального ремонта с целью проверки качества ремонта, а также с целью проверки характеристик трансформатора на соответствие требованиям нормативных документов.
- Программа испытаний трансформаторов имеет следующее содержание:
 - 1. *Определение характеристик изоляции обмоток.*
 - 2. *Испытания изоляции обмоток повышенным напряжением.*
 - 3. *Испытания повышенным напряжением изоляции элементов магнитопровода и вторичных цепей защитной и измерительной аппаратуры.*
- Эта изоляция испытывается относительно заземленных частей трансформатора напряжением **1 кВ в течение 1 мин.**
- 4. *Измерения сопротивлений обмоток постоянному току.*
- Эти измерения проводятся для выявления дефектов в паяных соединениях обмоток и контактах переключающих устройств.
Измерения производятся на всех ответвлениях РПН.
- Сопротивления разных фаз на соответствующих ответвлениях должны отличаться между собой не более чем на 2%.

Испытания трансформаторов после капитального ремонта

- **5. После ремонта, связанного с частичной или полной заменой обмоток выполняется проверка коэффициентов трансформации.**
 - Коэффициенты трансформации разных фаз на соответствующих ответвлениях должны отличаться между собой или от данных завода-изготовителя не более чем на 2%.
- **6. После ремонта, связанного с частичной или полной заменой обмоток проверяется группа соединений обмоток.**
- **7. Измерение тока и потерь холостого хода** проводятся у трансформаторов мощностью более 1000 кВ*А (опыт холостого хода). Эти измерения проводятся с целью выявления витковых замыканий в обмотках, замыканий в элементах магнитопровода и замыканий магнитопровода на бак трансформатора.
- **8. Испытание бака трансформатора на герметичность** проводится гидравлическим давлением столба масла высотой $h = 0,6$ м над уровнем заполненного расширителя или созданием избыточного давления 10 кПа в надмасляном пространстве расширителя. Продолжительность испытаний не менее 3 ч. Температура масла должна быть не ниже +10°C. При испытаниях не должно быть течи масла.
- **9. Испытания трансформаторного масла.**

Испытания трансформаторов после капитального ремонта

- 10. *Испытание трансформатора включением толчком на номинальное напряжение.*
- В процессе 3...5 - кратного включения не должны иметь место явления, указывающие на неудовлетворительное состояние трансформатора.
- Одним из показателей состояния трансформатора служит характер издаваемого им шума.
- Не должно быть потрескиваний внутри бака; гудение должно быть равномерным без периодических изменений уровня или тона.
- 11. *Испытания трансформатора под нагрузкой в течение 24 ч.*