



Расчёт характеристик трансформаторов

от преподавателя
ГАПОУ СО «СКТП и АС»
Дьяченко С.В.

РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

- Определение потерь короткого замыкания;
- ▶ Определение напряжения короткого замыкания;
- Определение механических сил в обмотках.
- Потерями короткого замыкания двухобмоточного трансформатора согласно ГОСТ 16110-82 называются потери, возникающие в трансформаторе при номинальной частоте и установлении в одной из обмоток тока, соответствующего ее номинальной мощности, при замкнутой накоротко второй обмотке.
- Напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора называется приведенное к расчетной температуре напряжение, которое следует подвести при номинальной частоте к зажимам одной из обмоток при замкнутой накоротко другой обмотке, чтобы в обеих обмотках установились номинальные токи. При этом переключатель должен находиться в положении, соответствующем номинальному напряжению.
- Напряжение короткого замыкания определяет падение напряжения в трансформаторе, его внешнюю характеристику и ток короткого замыкания (*зависимость напряжения на вторичной обмотке трансформатора от тока нагрузки $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ называется внешней характеристикой*).

Основные составляющие потерь короткого замыкания

- Потери короткого замыкания P_k в трансформаторе могут быть, разделены на следующие составляющие:
- **основные потери в обмотках НН и ВН**, вызванные рабочим током обмоток, $P_{осн1}$ и $P_{осн2}$;
- **добавочные потери в обмотках НН и ВН**, т.е. потери от вихревых токов, наведенных полем рассеяния в обмотках $P_{д1}$ и $P_{д2}$;
- **основные потери в отводах между обмотками и вводами** (проходными изоляторами) трансформатора $P_{отв1}$ и $P_{отв2}$;
- **добавочные потери** в отводах, вызванные полем рассеяния отводов, $P_{отв,д1}$ и $P_{отв,д2}$;
- **потери в стенках бака** и других металлических (ферромагнитных) элементах конструкции трансформатора, вызванные полем рассеяния обмоток и отводов, P_{δ} .

Опыт короткого замыкания

- Потери короткого замыкания могут быть рассчитаны или определены экспериментально в *опыте короткого замыкания трансформатора*.
- При опыте короткого замыкания номинальные токи в обмотках возникают при относительно малом напряжении (**5-10 % номинального значения**), а потери в магнитной системе, примерно пропорциональные второй степени напряжения, обычно пренебрежимо малы.

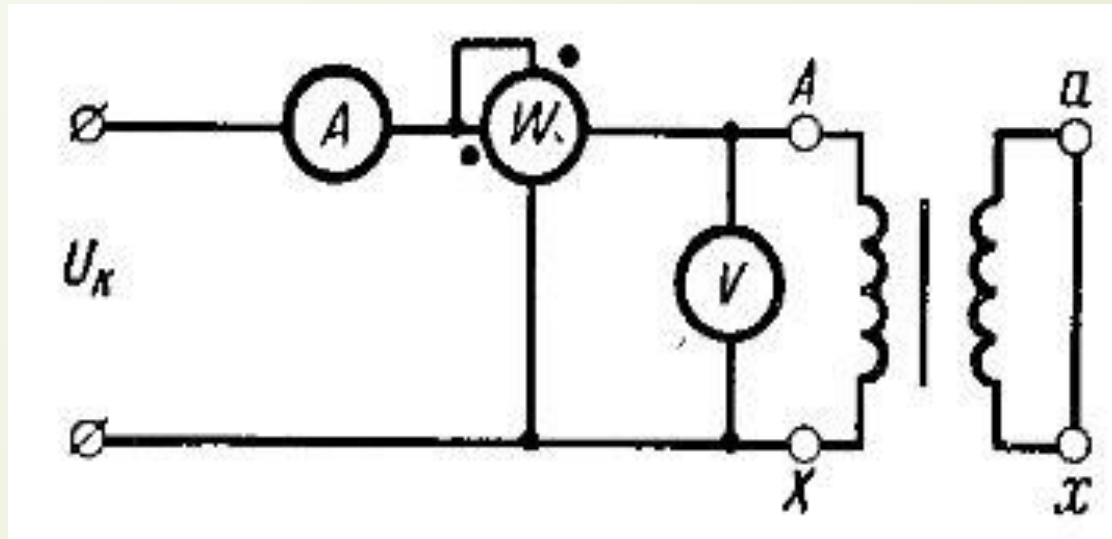


Схема опыта короткого замыкания трансформатора

Расчёт потерь короткого замыкания

- Обычно добавочные потери в обмотках и отводах рассчитывают, определяя коэффициент k_D увеличения основных потерь вследствие наличия поля рассеяния.
- Тогда сумма основных и добавочных потерь в обмотках определяется по формуле:

$$P_{оск1} + P_{д1} = P_{оск1} k_{Д1}$$

- Полные потери короткого замыкания определяются по формуле:

$$P_k = P_{оск1} k_{Д1} + P_{оск2} k_{Д2} + P_{отел1} k_{Д,отел1} + P_{отел2} k_{Д,отел2} + P_6$$

Согласно ГОСТ 11677-85 за расчетную (условную) температуру, к которой должны быть приведены потери и напряжение короткого замыкания, принимают:

- **75°C** для всех масляных и сухих трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости **A, E, B**;
- **115°C** для трансформаторов с изоляцией классов нагревостойкости **F, H, C**.

Расчёт потерь короткого замыкания

- *Полные потери короткого замыкания* готового трансформатора *не должны отклоняться* от значения, заданного ГОСТ или техническими условиями на проект трансформатора, **более чем на 10%.**
- Учитывая, что потери готового трансформатора вследствие нормальных допустимых отклонений в размерах его частей могут отклоняться на **$\pm 5\%$** расчетного значения, при расчете не следует допускать ***отклонение расчетных потерь короткого замыкания от гарантийного значения более чем на 5 %.***
- При нормальной работе трансформатора, т.е. при нагрузке его номинальным током при номинальных первичном напряжении и частоте, в его обмотках, отводах и элементах конструкции под воздействием токов обмоток и созданного ими поля рассеяния возникают ***потери, практически равные потерям короткого замыкания и одинаково с ними изменяющиеся при изменении тока нагрузки.***

Основные потери в обмотках

- ❑ Формула для определения основных потерь: $P_{осн} = I^2 R$.
- ❑ Преобразованная формула для расчета основных потерь:

$$P_{осн} = K J^2 G_0$$

- ❑ где J – плотность тока в обмотках; G_0 – масса меди обмоток.
- ❑ Масса металла каждой из обмоток может быть найдена по формуле:

- ❑
$$G_0 = c \pi D_{cp} w \Pi \gamma_0$$

- ❑ где c - число активных (несущих обмотки) стержней трансформатора; D_{cp} - средний диаметр обмотки, м; w - число витков обмотки; Π - сечение витка, м².

Добавочные потери в обмотках

- ❑ Определение добавочных потерь в обмотках практически сводится к расчету коэффициента увеличения основных электрических потерь обмотки $k_{д,0}$.
- ❑ Коэффициент рассчитывается отдельно для каждой обмотки трансформатора.
- ❑ Значение коэффициента зависит:
 - ❑ *от частоты тока f ;*
 - ❑ *от размеров поперечного сечения проводников обмотки;*
 - ❑ *от удельного электрического сопротивления ρ ;*
 - ❑ *от расположения обмоток по отношению к полю рассеяния трансформатора.*
- Любая обмотка трансформатора представляется в виде условной обмотки, в которой сохранено число проводников реальной обмотки в направлениях, параллельном и перпендикулярном направлению вектора магнитной индукции поля рассеяния обмотки.

Добавочные потери в обмотках

- Добавочные потери от вихревых токов, вызванные собственным магнитным полем рассеяния обмоток, неодинаковы для отдельных проводников, различным образом расположенных в обмотке по отношению к полю рассеяния.
- Наибольшие добавочные потери в двухобмоточном трансформаторе возникают в проводниках, находящихся в зоне наибольших индукций, т.е. в слое проводников, прилегающем к каналу между обмотками.
- Наименьшие потери возникают в слое, наиболее удаленном от соседней обмотки.
- При расчете потерь короткого замыкания обычно рассчитывают средний коэффициент увеличения потерь для всей обмотки, если она имеет однородную структуру, или для отдельных ее частей, если они отличаются размерами или взаимным расположением проводников.
- В винтовых обмотках кроме добавочных потерь, вызванных полем рассеяния, могут возникать добавочные потери вследствие неравномерного распределения тока между параллельными проводами от несовершенства транспозиций.
- Равномерно распределенная транспозиция в двух- или четырехходовой обмотке может считаться совершенной и практически не вызывающей добавочных потерь.

Добавочные потери в обмотках

- Добавочные потери пропорциональны четвертой степени размера проводника (***a** или **d***), измеренного в направлении, перпендикулярном направлению поля рассеяния.
- В связи с этим в концентрических обмотках с осевым направлением поля рассеяния следует располагать прямоугольный провод большим размером в осевом направлении, т.е. наматывать его плашмя.
- *При намотке такого же провода на ребро добавочные потери возрастают в несколько раз.*
- Добавочные потери в обмотках рационально рассчитанных силовых трансформаторов с концентрическими обмотками обычно достигают:
 - *от 0,5-1,0 до 3,0-5,0 % основных потерь;*
 - *в некоторых случаях до 10% при прямоугольном проводе;*
 - *не более 1-2% при применении круглого провода с диаметром не более 3,55 мм.*

Расчёт основных потерь в отводах

- Расчет основных потерь в отводах сводится к определению длины проводников и массы металла в отводах.
- Приближенное определение массы металла отводов производится по сечению витка отводов, равным сечению витка обмотки и длине отводов, зависящей от схемы соединения обмоток:
- для соединения в звезду: $l_{отв} \approx 7,5l$
- для соединения в треугольник: $l_{отв} \approx 14l$
- Массу металла проводов отводов определяют по формуле:

$$G_{отв} = l_{отв} \Pi_{отв} \gamma$$

где $l_{отв}$, м, $\Pi_{отв}$, м², γ - плотность металла отводов (для меди $\gamma_m = 8900$ кг/м³, для алюминия $\gamma_a = 2700$ кг/м³).

В силовых трансформаторах общего назначения потери в отводах составляют, как правило, **не более 5-8 % потерь короткого замыкания**, а добавочные потери в отводах - **не более 5 % основных потерь в отводах**.

Потери в стенках бака и других стальных деталях трансформатора

- Поля рассеяния обмоток и отводов трансформатора вызывают потери в ферромагнитных деталях конструкции трансформатора - стенке бака, прессующих балках ярм, прессующих кольцах обмоток и т. д. — это потери на гистерезис и вихревые токи.
- Потери зависят от распределения и интенсивности поля рассеяния, от расположения, формы и размеров ферромагнитных деталей и нестабильных магнитных свойств современных конструкционных сталей.
- Для трансформаторов мощностью от 100 до 63000 кВ·А можно с достаточным приближением определить потери в баке и деталях конструкции:

$$P_{\sigma} \approx 10kS$$

- где S - полная мощность трансформатора, кВ·А; k — коэффициент, зависящий от мощности трансформатора.
- Основными мерами по уменьшению добавочных потерь служат: рациональное распределение витков обмоток и поля рассеяния в трансформаторе, правильный выбор размеров и формы деталей, применение материалов, в которых не возникают или возникают малые потери в переменном магнитном поле.

РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

- В **трехобмоточном трансформаторе** напряжение короткого замыкания определяется для любой пары его обмоток при разомкнутой третьей обмотке.
- Поэтому трехобмоточный трансформатор имеет **три различных напряжения короткого замыкания**.
- Для всех трансформаторов напряжение короткого замыкания и его составляющие принято выражать в процентах номинального напряжения, а активную составляющую определять для средней эксплуатационной температуры обмоток **75 °С** для всех масляных и сухих трансформаторов **с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В**.
- Для трансформаторов с **изоляцией классов F, H, C** расчетная температура **115° С**.
- Активная составляющая напряжения короткого замыкания: $U_a = r_k I_{ном}$, где r_k - активное сопротивление короткого замыкания трансформатора, приведенное к одной из его обмоток, с учетом добавочных потерь, в обмотках, потерь в отводах и металлических конструкциях; $I_{ном}$ - номинальный ток обмотки, к числу витков которой приведено сопротивление $r_k = r_1 + r_2$.

РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

- Активная составляющая напряжения короткого замыкания определяется по формуле:

$$U_a = \frac{P_k}{S_H} \cdot 100, \%$$

- Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_p = \frac{x_k I_{ном}}{U_{ном}} 100$$

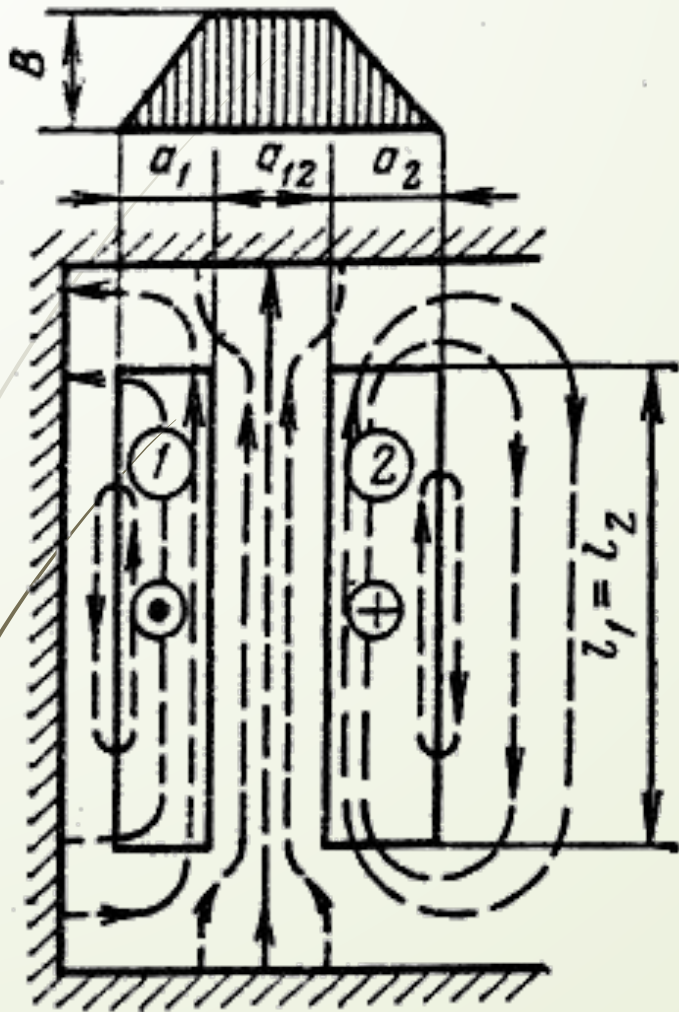
- x_k - реактивное сопротивление короткого замыкания трансформатора, приведенное к одной из его обмоток:

- $$x_k = \frac{7,9 f \omega^2 \pi d_{12}}{l} a_p k_p \cdot 10^{-6}$$

- Тогда, реактивная составляющая напряжения короткого замыкания:

$$u_p = \frac{7,9 f S' \beta a_p k_p}{u_e^2} \cdot 10^{-1}$$

РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ



Поле рассеяния двух
концентрических обмоток

При расчете U_p необходимо использовать реальные размеры рассчитанных обмоток трансформатора (a_p , a_2 , a_{12} , d_{12} , l), а не приближенными значениями β и a_p , найденными при определении основных размеров трансформатора.

Коэффициент k_p , учитывающий отклонение реального поля рассеяния от идеального параллельного поля, вызванное конечным значением осевого размера обмоток l по сравнению с их радиальными размерами (a_{12} , a_p , a_2) определяется по формуле:

$$k_p \approx 1 - \sigma$$

где $\sigma = (a_{12} + a_1 + a_2) / (\pi l)$.

Обычно k_p при концентрическом расположении обмоток и равномерном расположении витков по их высоте колеблется в пределах от **0,93 до 0,98**.

РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

- ❑ После определения активной и реактивной составляющих напряжение короткого замыкания трансформатора может быть найдено по формуле:

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}$$

- ❑ Напряжение короткого замыкания должно совпадать с u_k , регламентированным ГОСТ или заданным в техническом задании на проект трансформатора.
- ❑ Согласно ГОСТ 11677-85 напряжение короткого замыкания готового трансформатора на основном ответвлении не должно отличаться от заданного значения **более чем на $\pm 10\%$** .
- ❑ При изготовлении трансформатора вследствие возможных отклонений в размерах обмоток (в частности, в размерах a_1 , a_2 и a_{12}), лежащих в пределах нормальных производственных допусков, u_k готового трансформатора может отличаться от расчетного значения **на $\pm 5\%$** .

РАСЧЁТ НАПРЯЖЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

- В тех случаях, когда полученное значение u_k отклоняется **более чем на $\pm 5\%$** заданного, его изменение в нужном направлении может быть достигнуто за счет изменения реактивной составляющей u_p .
- Небольшие изменения могут быть получены путем увеличения или уменьшения осевого размера обмотки l при соответствующем уменьшении или увеличении радиальных размеров обмоток a_1 и a_2 .
- Более резкое изменение u_p можно получить изменением **напряжения одного витка u_v** за счет увеличения или уменьшения диаметра стержня магнитной системы d или индукции B_c в нем.
- Изменять изоляционное расстояние a_{12} не рекомендуется.

Механические силы, действующие на обмотки трансформатора

- В результате взаимодействия магнитного поля рассеяния с током в обмотке в последней возникают механические усилия.
- При нормальном режиме работы, при нагрузке трансформатора, не превышающей его номинальной нагрузки, эти механические усилия не представляют опасности для целостности обмоток.
- При коротких замыканиях, когда бросок тока короткого замыкания достигает значения, в 20—25 раз превышающего номинальный ток, электромагнитная сила, пропорциональная квадрату силы тока, возрастает в 400—600 раз.
- Мгновенное значение тока короткого замыкания ввиду наличия апериодической составляющей тока может быть еще в 2 раза больше, что может вызвать значительные механические воздействия в трансформаторе.
- В связи с этим конструкция обмоток и опорных деталей должна быть рассчитана таким образом, чтобы она могла выдержать возникающие механические усилия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СИЛ В ОБМОТКАХ

- Короткое замыкание в трансформаторе сопровождается:
- *многократным увеличением токов в обмотках трансформатора по сравнению с номинальными токами;*
- *повышенным нагревом обмоток;*
- *ударными механическими силами, действующими на обмотки и их части.*
- Проверка обмоток на механическую прочность при коротком замыкании включает:
 - *определение наибольшего установившегося и наибольшего ударного тока короткого замыкания;*
 - *определение механических сил между обмотками и их частями;*
 - *определение механических напряжений в изоляционных опорных и междукатушечных конструкциях и в проводах обмоток;*
 - *определение температуры обмоток при коротком замыкании.*

Расчёт токов короткого замыкания

- Действующее значение установившегося тока короткого замыкания зависит от:
 - *от мощности трансформатора;*
 - *от мощности короткого замыкания энергосистемы;*
 - *от напряжения короткого замыкания трансформатора.*
- Действующее значение наибольшего установившегося тока короткого замыкания для трансформаторов мощностью менее 1000 кВ·А определяется по формуле (если принять $S_k = \infty$):

$$I_{k,y} = I_{ном} \frac{100}{u_k}$$

- где $I_{ном}$ — номинальный ток соответствующей обмотки катушки или витка.

Класс напряжения ВН, кВ	6-10	10-35	110	150	220	330	500
Мощность короткого замыкания электрической сети, МВ·А	500	2500	15000	20000	25000	35000	50000

Ударный ток короткого замыкания

□ В начальный момент ток короткого замыкания вследствие наличия *апериодической составляющей* может значительно превысить установившийся ток КЗ и вызвать механические силы между обмотками, превышающие в несколько раз механическое воздействие при установившемся токе короткого замыкания.

□ Ударный ток короткого замыкания определяется по формуле:

$$i_{\max} = \sqrt{2} k_{\max} I_{k\gamma}$$

где $k_{\max}$ - коэффициент, учитывающий максимально возможную апериодическую составляющую тока короткого замыкания.

- Наибольшую опасность при коротком замыкании представляют для обмоток трансформатора механические силы, возникающие между обмотками и их частями.
- Эти механические воздействия необходимо учитывать при расчете и конструировании трансформатора, так как они могут привести:

- *к разрушению обмотки;*
- *к деформации или разрыву витков;*
- *к разрушению опорных конструкций.*

Механическая прочность обмоток

- ❑ Механические силы возникают в результате взаимодействия тока в обмотке с магнитным полем обмоток.
- ❑ Расчет механических воздействий, так же как и расчет поля обмоток, представляет очень сложную задачу, так как обмотки трансформатора не являются монолитными в механическом отношении.
- ❑ Конструктивно каждая обмотка трансформатора состоит из проводников, разделенных витковой изоляцией в виде обмотки из кабельной бумаги или пряжи и в некоторых видах обмоток междуслойной изоляцией - прослойками из кабельной бумаги или картона.
- ❑ Между катушками, а в некоторых обмотках и между витками размещаются прокладки, набранные из электроизоляционного картона.
- ❑ Механические силы, возникающие при коротком замыкании и действующие на проводники обмотки, неравномерно распределяются между ее витками.
- ❑ Суммируясь, они создают силы, действующие на междукатушечную и опорную изоляцию обмоток, рейки, образующие вертикальные каналы, и изоляционные цилиндры.

Механическая прочность обмоток

- Одним из условий, позволяющих получить обмотку, выдерживающую воздействию механических сил, возникающих при коротком замыкании трансформатора, является максимальная монолитность ее конструкции.
- Монолитность конструкции обмотки обеспечивается:
- *предварительной прессовкой электроизоляционного картона, используемого для изготовления изоляционных деталей обмотки;*
- *механическим поджимом витков обмотки в осевом и радиальном направлениях при ее намотке;*
- *осевой опрессовкой обмотки после ее намотки и сушки за счет воздействия сил, близких к осевым силам при коротком замыкании.*
- *пропиткой обмотки после ее изготовления, сушки и опрессовки глифталевым или другим лаком.*
- При расчетах трансформаторов обычно производится проверочное определение **суммарных механических сил**, действующих на всю обмотку **по полному потоку рассеяния или по полному току обмотки.**
- Обмотка при расчете считается монолитной в механическом отношении.

Механическая прочность обмоток

- Сила, действующая на каждый провод витка, зависит:
- *от тока в проводе, который в большинстве обмоток можно считать одинаковым для всех проводов обмотки;*
- *индукции поля рассеяния в месте нахождения провода, которая будет различной для различных проводов, расположенных в разных частях обмотки.*
- Рассматривая в совокупности всю обмотку как монолитное тело и все поле рассеяния, можно найти суммарные силы, действующие на обмотку в осевом и радиальном направлениях, и получить общее приближенное представление о механической прочности обмоток.
- При рассмотрении суммарных сил, действующих на обмотки, отдельно оценивают силы:
- **осевые**, т.е. *сжимающие обмотку в осевом направлении;*
- **радиальные**, *растягивающие внешнюю обмотку и изгибающие и сжимающие провода внутренней обмотки.*
- Осевые силы оказывают давление на междукатушечную, междувитковую и опорную изоляцию обмотки, для которой должна быть обеспечена прочность на сжатие.



Спасибо за внимание!
Успехов в учёбе !