

## Процесс включения трансформатора на холостой ход и короткое замыкание

Лурье А.И.

*Даны схема замещения трансформатора и методика расчёта режимов с намагничивающим током. Подробно рассмотрены вопросы, связанные с током включения. Приведены рекомендации по его уменьшению. Показано, что намагничивающий ток не оказывает заметного влияния на стойкость трансформаторов при КЗ. При испытаниях трансформаторов на стойкость при КЗ принимаются меры для снижения влияния намагничивающего тока.*

Включение трансформатора в сеть переменного тока может сопровождаться насыщением его магнитопровода (стержней или ярем), вследствие чего возможно возникновение бросков намагничивающего тока, при этом переходный процесс имеет ряд особенностей по сравнению с переходным процессом при включении ненасыщенного трансформатора [1, 2].

**Токи включения** силовых трансформаторов на холостой ход (ХХ) в сотни и тысячи раз больше тока ХХ в установившемся режиме, они могут быть на порядок больше номинального тока и обычно сравнимы с ударным током короткого замыкания (КЗ). Последнее обстоятельство послужило причиной того, что до последнего времени броски тока ХХ особое внимание привлекали специалистов **по релейной защите**, которая может воспринять токи включения, как токи КЗ. При этом произойдут ложные срабатывания защиты и отключение от сети только что включённого трансформатора. Бывали случаи, когда при этом из-за бросков тока невозможно было включить трансформатор. Например, пришлось разрабатывать меры, чтобы подключать к портовой сети новые судовые трансформаторы. Иногда возникает опасность повреждения трансформаторов электродинамическими силами, вызываемыми бросками тока ХХ, например в электропечных трансформаторах, которые имеют частые включения на ХХ и нагрузку, а их ток КЗ ограничен сопротивлением "короткой сети" на стороне нагрузки (части силовой сети от печного трансформатора до электрической печи). Это значит, что стойкость при КЗ печных трансформаторов принципиально может быть рассчитана на меньшие токи, чем трансформаторов общего назначения. Однако токи включения этих трансформаторов могут быть иногда больше нормированных для этих трансформаторов токов КЗ, так как они работают при активной нагрузке, что приводит, как это показано далее, к большой остаточной индукции в стержнях, от которой в значительной степени и зависит значение тока включения. Имели место аварии электропечных трансформаторов, работавших в режиме частых включений, из-за электродинамических сил, вызываемых большими токами включения.

К сожалению, в учебной литературе вопросы расчётов режимов трансформаторов, сопровождающихся сильным насыщением (намагничиванием) стали, изложены очень упрощённо, без учёта главных влияющих факторов. На эту тему существует обширная отечественная и зарубежная специальная литература. Прежде всего, можно рекомендовать [3], где, в частности, изложена современная теория и методика расчёта тока включения трансформаторов, а также приведена библиография по этому вопросу.

**Основные положения.** Под намагничивающим током трансформатора понимают взаимно не скомпенсированный ток обмоток. Например, в двухобмоточном трансформаторе с  $i_{1W1}$  и  $i_{2W2}$  намагничивающий ток  $i_{\text{намагн.}} = (i_{1W1} - i_{2W2}) / w_1$ .

В режиме ХХ, когда напряжение подключается к одной из обмоток при отключённых остальных, весь ток этой обмотки является намагничивающим. В частном случае часто этот ток включения (всю кривую тока) называют бросками тока ХХ или бросками тока включения.

По аналогии с ударным током КЗ наибольшее мгновенное значение броска тока включения (как правило, первого броска) может быть названо **ударным током XX** или **ударным током включения**.

**Магнитное поле** трансформатора в присутствии намагничивающего тока - сложное поле, одну область которого - стержень, ярма, соседний стержень - занимает нелинейная среда, электротехническая сталь. В настоящее время существуют программы расчёта, при помощи которых такое поле может быть рассчитано (ELCUT, FEMM, ANSYS и др.). Однако для понимания электромагнитных процессов, для практических расчётов можно ввести ряд упрощающих допущений, используя которые, можно получить полезные результаты.

Магнитное поле трансформатора можно упрощённо представить себе как магнитное поле токов обмоток без стержня. Насыщенный стержень можно заменить при этом тонкой фиктивной обмоткой, расположенной на воображаемой поверхности стержня. Высота такой фиктивной обмотки  $h_s$  превышает реальную высоту обмотки  $h$  на 10-15 %, а её постоянные во времени ампервитки равны  $B_{sh_s} / \mu_0$ . Такая фиктивная обмотка моделирует сильное магнитное поле внутри насыщенного стержня, имеющего идеализированную характеристику намагничивания такую же, как и принятая для данной ранее схемы замещения с ключом К. Подробно метод расчёта поля описан в [1, 8]. Метод фиктивных обмоток очень удобен тем, что он позволяет воспользоваться всем имеющимся арсеналом методов расчёта магнитного поля, электромагнитных сил и стойкости при КЗ, применяемым для трансформаторов, например, разработанными в ВЭИ отраслевой методикой расчёта [1, 9] и системой программ РЭСТ [1, 10].

В режиме включения трансформатора на XX магнитное поле обмотки с током (ударным током XX) при насыщенном стержне напоминает магнитное поле этой обмотки в режиме КЗ. В таком поле на обмотку с током действуют электродинамические силы, во многом аналогичные силам при КЗ.

**Осевые силы** при токе включения сжимают обмотку. Если сравнить эти осевые силы с силами при КЗ (при таком же токе), то силы в режиме XX окажутся в несколько раз больше [8]. Дело в том, что магнитный поток в режиме XX, созданный магнитной индукцией на площади в области внутри обмотки и стержня, существенно больше, чем магнитный поток режима КЗ в канале рассеяния, имеющем при той же индукции меньшую площадь. Можно также пояснить это тем, что в режиме КЗ участвует не одна, а две обмотки с разнонаправленными токами. Верхняя половина каждой обмотки при этом отталкивается от нижней половины другой обмотки, снижая осевую силу сжатия каждой обмотки по сравнению с вариантом, когда есть только одна обмотка. Однако ударный ток XX в несколько раз меньше ударного тока КЗ, поэтому осевые силы, пропорциональные квадрату тока, при включении на XX обычно меньше осевых сил КЗ. Всё же опасность этих осевых сил XX сохраняется из-за того, что включения трансформатора в сеть бывают гораздо чаще, чем КЗ, а многократные воздействия осевых сил могут привести к неблагоприятному накоплению остаточных деформаций (кумулятивный эффект).

**Радиальные силы** обмотку растягивают. Они могут быть ниже, чем силы КЗ из-за меньшего ударного тока XX. Следует заметить, что если при КЗ внутренняя обмотка радиальными силами сжимается, что для обмотки опасно из-за возможности потери радиальной устойчивости, то при включении трансформатора в сеть со стороны этой обмотки в ней возникают растягивающие радиальные силы, как правило, существенно менее опасные, чем сжимающие радиальные силы.

При ударном токе включения на обмотку, её части, отводы так же, как и при КЗ, действуют и тангенциальные (поворачивающие, скручивающие) силы [1].

Рассмотрим важный вопрос, связанный с влиянием намагничивающего тока в режимах КЗ трансформатора.

Для двухобмоточного трансформатора с обмотками НН и ВН (обмотка НН расположена ближе к стержню), работающего в электрической сети, возможны следующие варианты КЗ на его вводах:

1. Трансформатор работает в сети, происходит КЗ на вводах НН.
2. Трансформатор работает в сети, происходит КЗ на ВН.
3. Трансформатор не возбуждён, происходит включение в сеть со стороны ВН при КЗ на стороне НН (например, на случайно оставленную после ремонта закоротку).
4. Трансформатор не возбуждён, происходит включение в сеть со стороны НН при КЗ на ВН (например, на закоротку).

Первые два случая - наиболее вероятные в эксплуатации.

В первом случае в переходном режиме КЗ в токе возникает апериодическая составляющая, увеличивающая максимальный бросок тока (ударный ток КЗ) почти до двойной амплитуды установившегося тока КЗ. Коротко-замкнутая обмотка НН "вытесняет" переменный магнитный поток из стержня, и он циркулирует в канале рассеяния между обмотками и в ярме или в соседних стержнях. Максимум ударного тока получается в случае возникновения КЗ в момент перехода кривой напряжения через нуль (в эксплуатации это редко бывает, так как пробой изоляции обычно происходит в другой фазе). Большого магнитного потока в ярме не возникает, поскольку затухающая апериодическая составляющая магнитного потока "остаётся" в стержне.

Аналогичная картина и во втором случае, только стержень и ярмо "меняются местами". Большого магнитного потока в стержне не возникает, так как затухающая апериодическая составляющая магнитного потока "остаётся" в ярме. Объяснение этого - в момент возникновения КЗ магнитный поток в стержне и ярме (если перед КЗ трансформатор не нагружен, то они примерно одинаковы и примерно равны потоку ХХ) проходит через максимум, и он не может в силу известного закона мгновенно снизиться до нуля - своего установившегося значения.

Таким образом, никакого заметного **увеличения ударного тока КЗ** в этих двух **наиболее важных случаях** из-за появления намагничивающего тока **не наблюдается**.

Третий и четвёртый случаи - наименее вероятные в эксплуатации.

### Список Литературы

1. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях. М.: Знак, 2005.
2. Лурье А.И. Об определении максимального тока при включении цепи RL на переменное напряжение // Электричество. 1997. № 12.
3. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981.
4. Елагин В.Н., Лурье А.И., Панибратец А.Н. Броски тока включения трансформатора // Электротехника. 1997. № 2.
5. Bertagnolli G. Short-circuit duty of power transformers // ABB Transformatori. Legnano (Milano) - Italy, 1998.
6. Del Vecchio R.V., Poulin D., Feghali P.T., Shah D.M., Ahuja R. Transformer Design Principles. With Applications to Core-Form Power Transformers. NY USA, Taylor & Francis, 2002.
7. Кузьменко В.А., Лурье А.И., Панибратец А.Н., Чуприков В. С. Снижение тока включения трансформатора // Электротехника. 1997. №2.

8. Васильев А.Б., Лурье А.И. Расчёт магнитного поля и электродинамической стойкости трансформаторов при бросках намагничивающего тока // Электричество. 1992. № 1.
9. Зенова В.П., Лурье А.И., Мильман Л.И., Панибратец АН. Отраслевая методика расчёта: Трансформаторы силовые. Расчёт электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании (РТМ16800.428-77, РД16-431-88).
10. Зенова В.П., Левицкая Е.И., Лурье А.И. и др. Система программ РЭСТ для расчёта электродинамической стойкости, потерь и нагревов трансформаторов и реакторов // Электротехника. 1996. №.8.
11. ГОСТ 20243-74. Трансформаторы силовые. Методы испытаний на стойкость при коротком замыкании.
12. А.с. 1335904 СССР. Устройство для испытаний трансформаторов на электродинамическую стойкость при коротком замыкании / Левицкая Е.И., Лурье А.И., Ляшенко В.Д.

*Автор: Лурье Александр Иосифович* - ведущий научный сотрудник ВЭИ, канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1958 г. Защитил диссертацию по теме "Исследование и применение математического моделирования магнитных полей рассеяния трансформаторов и реакторов на электропроводящей бумаге" в 1965 г.

Полное содержание статьи Вы можете найти в первоисточнике

Источник: © Электротехника 2/2008

Материал размещен на [www.transform.ru](http://www.transform.ru): 19.03.2008 г.