

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ УСИЛИЙ ПРЕССОВКИ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

В. И. Емельянов, С. С. Комар
НПО «Логотех»

Ослабление усилий прессовки обмоток трансформатора является достаточно серьёзной проблемой в эксплуатации. Статистические данные, указанные В. В. Соколовым, показывают, что для силовых трансформаторов мощностью выше 100 МВА отказы вследствие деформации обмоток колеблются от 4,4 % до 28,5 % по отношению ко всем отказам трансформаторов находящихся в эксплуатации.

Виктор Владимирович Соколов – член СИГРЭ, руководитель группы WG A2.18 «Планирование срока службы трансформаторов» и «Влажность в трансформаторах», член консультативного совета комитета А2 «Стратегия», организатор Научно-инженерного центра «ЗТЗ-Сервис», сотрудник компании «Келман Сервис», ВЭИ, Электросетьсервис.

Эти данные основаны на анализе повреждаемости трансформаторов СНГ, Канады и США.

Следует заметить, что деформация обмоток под воздействием импульсных электродинамических нагрузок может произойти только в том случае, когда остаточные усилия прессовки достигают недопустимо низких уровней.

В настоящее время определение остаточных усилий прессовки обмоток трансформаторов осуществляют двумя методами.

Первый метод основан на анализе вибрации бака трансформатора при различных нагрузках. Теоретическая и аппаратно-программная разработка метода выполнена В. А. Русовым («Димрус»).

Второй метод основан на спектральном анализе ЭДС, наведённых в обмотках трансформатора при его импульсном механическом нагружении. Теоретическая разработка выполнена ВНИИТФ, аппаратно-программная разработка выполнена НПО «Логотех». Испытания выполняют на полностью расшинованном трансформаторе.

Целью анализа состояния прессовки обмоток трансформатора является определение граничного уровня прессовки, при достижении которого трансформатор подлежит ремонту с подпрессовкой обмоток.

Для определения этой величины должны быть известны коэффициенты запаса по току проектного короткого замыкания. В работах ВЭИ рекомендуется ток проектного короткого замыкания принимать на уровне 30 – 50 % от максимально допустимого (расчётного). Ток проектного короткого замыкания определяется по напряжению короткого замыкания,

указанному в паспорте на трансформатор. Расчётное усилие прессовки обмоток соответствует силе, возникающей при расчётном коротком замыкании.

Таким образом, коэффициент запаса по граничному уровню прессовки обмоток находится в пределах от ~ 4 до ~ 10 единиц. Следовательно, при величине усилия прессовки обмоток, составляющей ~ 25 % от расчётного уровня, трансформатор выдержит любое проектное короткое замыкание без каких либо отрицательных последствий, а «критическим» уровнем усилий прессовки обмоток является величина, соответствующая ~ 10 % от расчётного уровня.

Заключение о состоянии прессовки обмоток выдают на основании «типовых» данных, полученных либо на заводе-изготовителе либо в процессе капитального ремонта трансформатора. В настоящее время я «типовой» ряд состоит из двенадцати трансформаторов. Этого очень мало, поэтому необходимо пользоваться пересчетом с трансформаторов-прототипов, имеющих близкие характеристики.

Под «типовым» трансформатором в нашем случае понимается некий трансформатор-прототип, для которого известны частоты собственных колебаний ЭДС, наведённой в обмотках при импульсном механическом нагружении и величина относительных остаточных усилий прессовки обмоток в процентах относительно заводского уровня.

Трансформатор считается подобным прототипу, если он имеет следующие общие с ним характеристики:

- одна и та же принципиальная конструкция;
- одни и те же расположение и последовательность основных обмоток;
- одни и те же системы прессовки и крепления обмоток.

Конечно, получаемые результаты содержат некую погрешность, но для приблизительных оценок состояния с учетом формы спектра наведённой ЭДС могут быть приемлемы.

Получение исходных величин в заводских условиях – это идеальный вариант и он возможен только на новых трансформаторах. Основная масса характеристик трансформаторов-прототипов была получена при капитальных ремонтах трансформаторов.

В сопроводительных технических документах должны быть указаны значения измеренных сил прессовки каждого прессующего кольца или осевых усилий на каждом нажимном винте (ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Приложение Е (обязательное). Перечень технических данных и характеристик, указываемых в паспорте трансформатора).

Используя гидравлическую аппаратуру и измерительные инструменты, определяют остаточные усилия прессовки обмоток, которые могут быть

приняты в качестве базовых для использования данного трансформатора в качестве прототипа.

В сопроводительных технических документах на очень старые трансформаторы заводские значения измеренных сил прессовки не указаны. В этом случае расчёт усилий прессовки выполняют по допустимому давлению на картон.

Точных указаний по величине допустимых давлений на картон не существует, однако, в книге А. В. Сапожникова «Конструирование трансформаторов» рекомендуется удельное давление 25 кг/см^2 , там же указано значение 40 кг/см^2 . ГОСТ Р 55188 – 2012 определяет давление на картон при вертикально расположенных слоях обмотки меньше или равным $35 - 40 \text{ МПа}$ ($350 - 400 \text{ кг/см}^2$). В научных публикациях ВЭИ встречаются значения 20 кг/см^2 , 40 кг/см^2 , 50 кг/см^2 , 60 кг/см^2 и 74 кг/см^2 . Разброс рекомендаций весьма значителен, поэтому принимают некую величину более или менее соответствующую «здоровому» смыслу. Используя эту величину, вычисляют усилие на каждом прессующем кольце и выполняют прессовку обмоток. В этом случае результаты могут быть использованы как оценочные (приблизительные).

Аппаратно-программный комплекс разработки НПО «Логотех» эксплуатируется энергопредприятиями России более десяти лет. За это время обследовано несколько сотен трансформаторов различной мощности. Некоторые из них подвергались капитальному ремонту, в процессе которого были получены характеристики, для включения этого типа трансформаторов в «типовой» ряд.

В качестве иллюстрации использования методики НПО «Логотех» рассмотрим результаты трёх обследований автотрансформатора АТДЦТГ–180000/220 1965 года выпуска. Этот трансформатор находится на подстанции «Исаково» город Челябинск. В 1998 году трансформатор был дважды обследован с целью определения остаточных усилий прессовки обмоток до и после капитального ремонта. Подпрессовка обмоток выполнена до уровней, указанных в документации завода-изготовителя. На рисунках 1 – 3 сравниваются спектрограммы колебаний ЭДС, наведённых в обмотках трансформатора до и после прессовки, при этом видно, что частоты колебаний существенно возросли пропорционально остаточным усилиям прессовки обмоток.

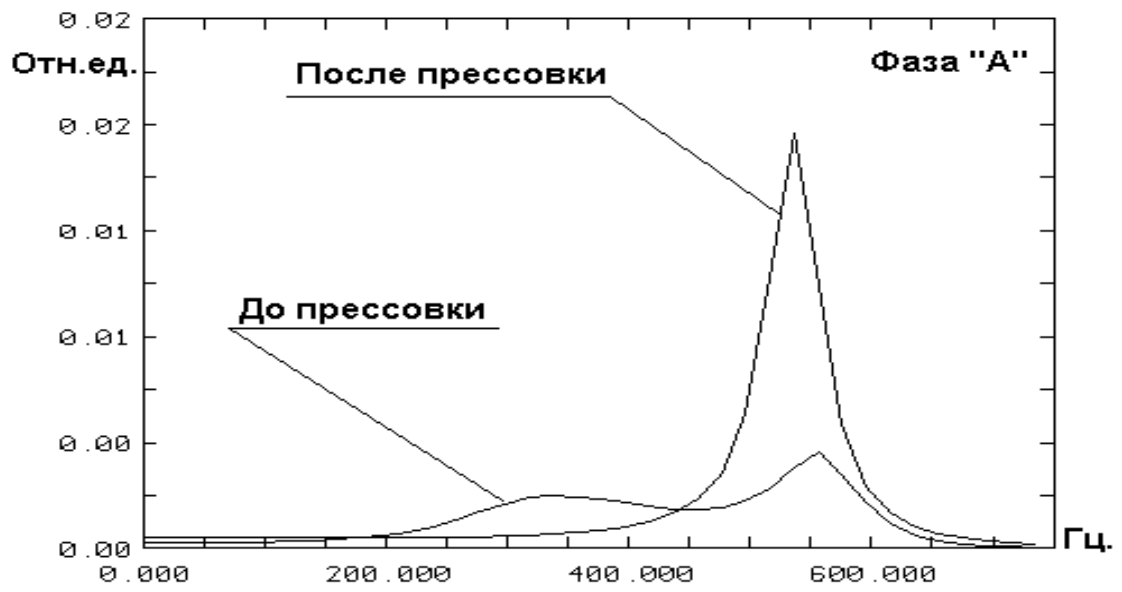


Рисунок 1

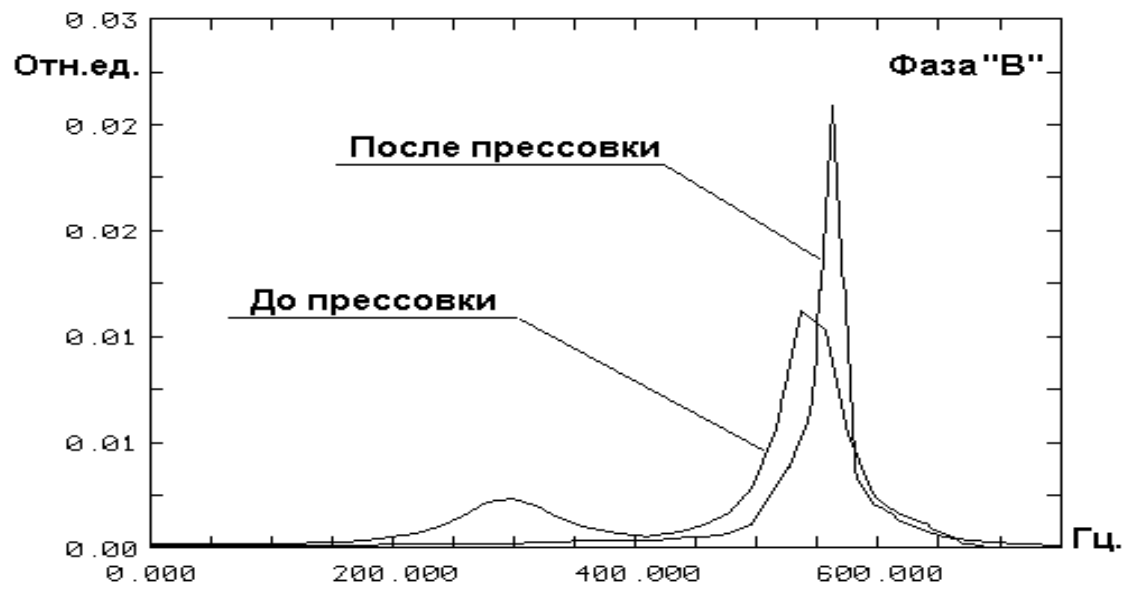


Рисунок 2

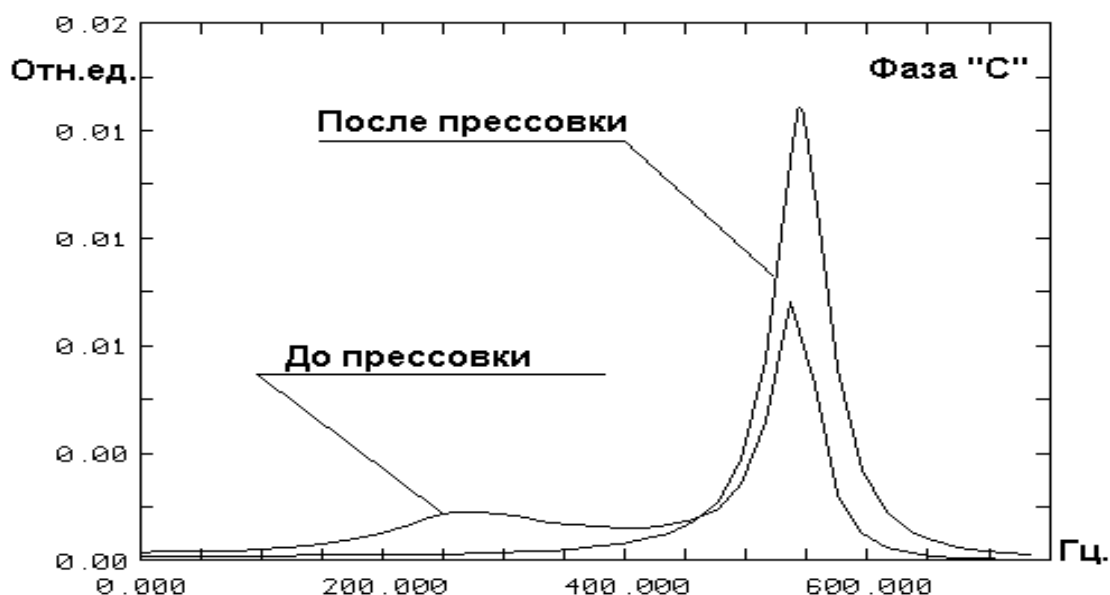


Рисунок 3

Через девять лет эксплуатации трансформатор был обследован повторно. На рисунках 4 – 5 показаны спектрограммы колебаний ЭДС, наведённых в обмотках трансформатора, на которых видно, что значения частот колебаний снизились, следовательно, усилие прессовки обмоток ослабло.

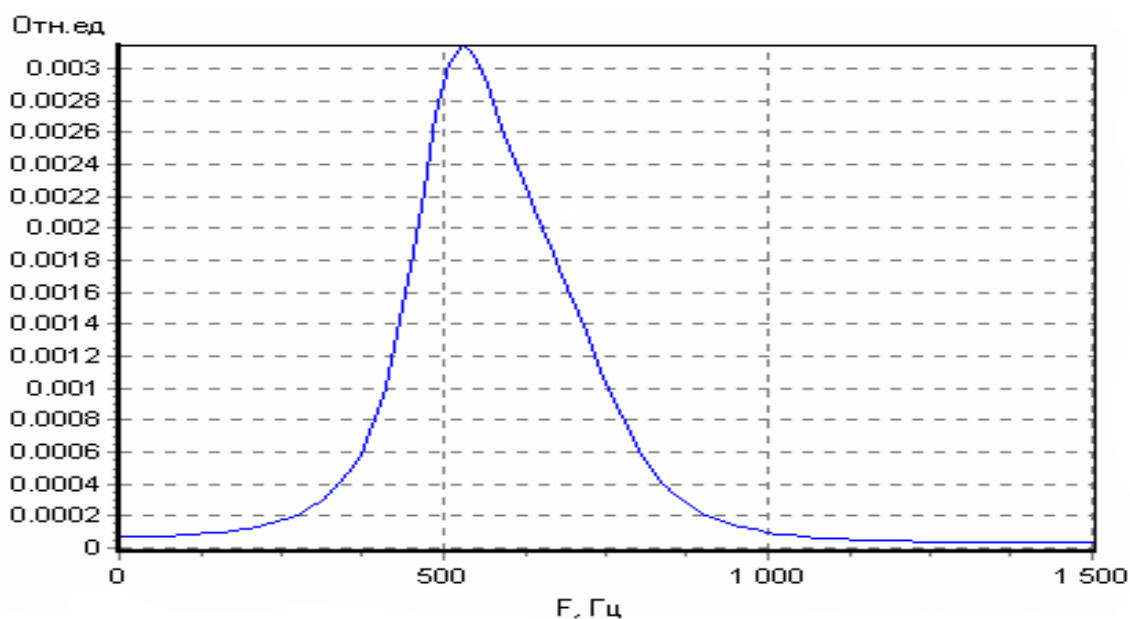


Рисунок 4 – Спектрограмма колебаний обмотки ВН фазы «А».

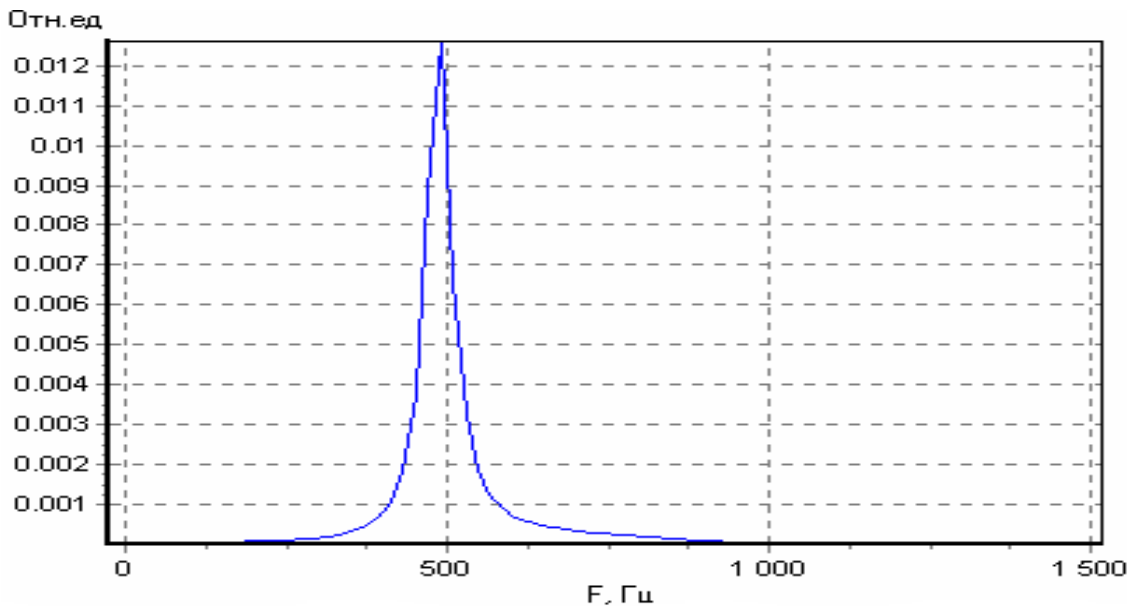


Рисунок 5 – Спектрограмма колебаний обмотки ВН фазы «В».

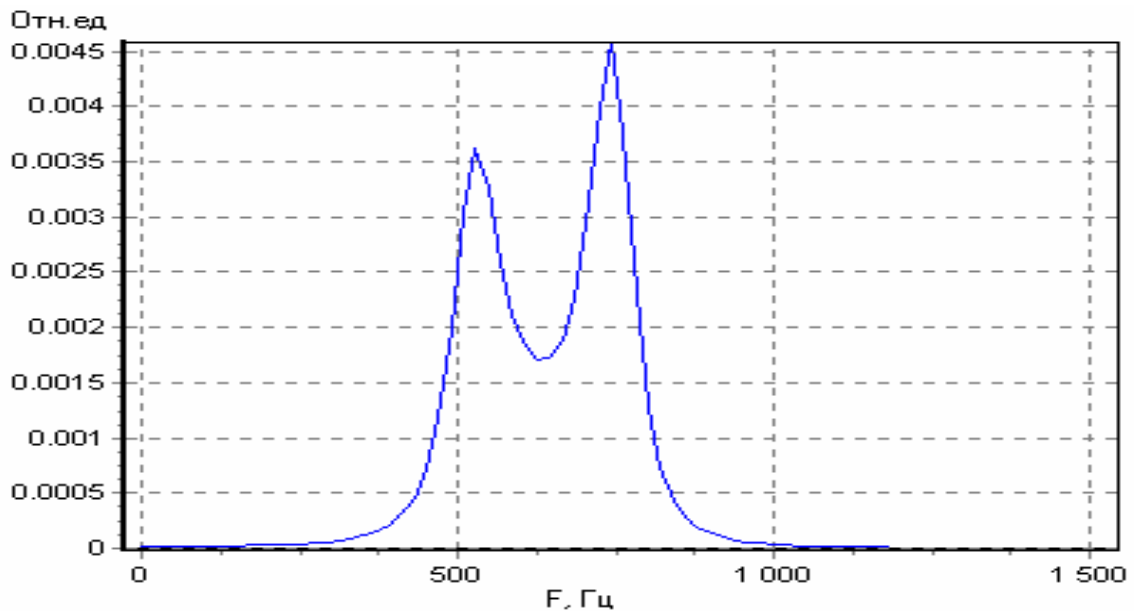


Рисунок 6 – Спектрограмма колебаний обмотки ВН фазы «С».

Нетрудно заметить, что по мере изменения усилия прессовки обмоток трансформатора частота первого максимума спектрограммы изменяется согласно закону, на котором основана методика:

$$\frac{F_{ост}}{F_{нач}} = \left(\frac{f_{ост}}{f_{нач}} \right)^{\frac{2n}{n-1}},$$

где $F_{ост}$ – остаточное усилие прессовки;
 $F_{нач}$ – начальное усилие прессовки;
 $f_{ост}$ – собственная частота свободных колебаний системы при остаточном усилии прессовки;

$f_{\text{нач}}$ – собственная частота свободных колебаний системы при начальном усилии прессовки;

n – показатель степени, определяющий характер нелинейности.

В настоящее время в России начали выпускать трансформаторы, у которых система прессовки обмоток существенно отличается от систем, выпускавшихся ранее. При изготовлении обмоток у таких трансформаторов витки склеивают, прессуют и выдерживают при заданном давлении и повышенной температуре. В итоге получают узлы сборки, в которых отсутствуют внутренние механические напряжения. Крепление обмоток осуществляют через прессующие кольца, изготовленные из специального картона. Окончательную прессовку обмоток выполняют с помощью регулировочных прокладок (клиньев), изготовленных из фанеры или картона. Такие трансформаторы не могут быть отремонтированы в полевых условиях.

В 2015 году на заводе ЗАО «Группа СВЭЛ» выполнен цикл экспериментов с обмотками трансформатора ТРДН – 40000/110У1.

При анализе результатов первое, на что обратили внимание – узкий диапазон изменения частоты колебаний ЭДС, наведённой в обмотках трансформатора. Второе – хаотичное изменение значения частоты: с повышением нагрузки прессования наблюдается как увеличение, так и уменьшение значения частоты.

При измерениях перемещений прессующего кольца обнаружено отсутствие монотонности: при достижении некоторых «критических» значений нагрузки прессования наблюдались отрицательные значения приращения перемещений. Это указывает на обмятие материала прессующих колец.

Все эти наблюдения указывают на то, что механическая жёсткость обмоток, как отдельных узлов сборки, существенно превышает жёсткость и прочность прессующих колец. Такая конструкция более устойчива к импульсным нагрузкам, чем «абсолютно» жёсткая или равной жёсткости. Для уточнения и получения более устойчивых результатов, требуются дополнительные исследования.