

**В.В. КУЗЬМИН**, д-р техн. наук, проф., гл. специалист  
АО "ЭЛТА", Харьков

**В.В. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

**В.С. ШПАТЕНКО**, аспирант, НТУ "ХПИ"

## **ОСОБЕННОСТИ СИЛОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

На основе нового подхода к расчету электродинамических сил, возникающих в активной зоне, т.е. в обмотках и сердечнике однофазного трансформатора, выполнен анализ величины механических нагрузок, действующих на обмотки обычного и "сверхпроводящего" трансформатора.

**Ключевые слова:** трансформатор, механические нагрузки, действующие на обмотку.

**Введение.** Переходные процессы в трансформаторах возникают, как и в обычной электрической цепи, содержащей индуктивность, при всевозможных коммутациях, служащих причиной изменения токов в обмотках трансформаторов. Решить задачу о рассмотрении переходных процессов в трансформаторах при всяких изменениях их нагрузок можно с общих позиций рассмотрения переходных процессов в электрических цепях. Однако наиболее интересные процессы имеют место при подключении трансформатора к сети и при коротком замыкании на зажимах вторичной обмотки. При этом, как известно, необходимо составить и решить систему дифференциальных уравнений в мгновенной форме для цепей трансформатора. В то же время решение таких уравнений достаточно громоздко. При несинусоидальном несимметричном напряжении питания в воздушном зазоре появляются спектры временных гармоник.

При больших нагрузках тонкие листы шихтованного магнитопровода теряют устойчивость и коробятся. Для увеличения механической устойчивости кромки магнитопровода иногда провариваются по специально выштампованным лункам. Стержни и яра шихтованного магнитопровода стягивают (прессуются) и скрепляют (фиксируются) таким образом, чтобы обеспечивались необходимые форма и размеры поперечного сечения магнитопровода. Качество магнитопровода определяет надежность работы трансформатора, т.е. всего энергетического узла.

**Силовые взаимодействия в сердечнике однофазного транс-**

© Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Шпатенко В.С., 2013

**форматора.** Анализ статистики отказов трансформаторов показывает, что основными причинами повреждений являются:

– наличие локальных дефектов в главной и продольной изоляции, приводящих к возникновению и развитию электроразрядных процессов;

– наличие механических деформаций обмоток и магнитопроводов в результате электродинамических воздействий от протекания токов при КЗ, переходных, а иногда и номинальных, процессах.

Следовательно, основное внимание при анализе эксплуатации следует уделять:

1) маслосборной изоляции высокого и низкого напряжения (ВН и НН), витковой изоляции обмоток;

2) наличию тепловых (электрических) явлений в магнитной системе и контактах;

3) состоянию вводов, защитных систем, заземляющих устройств и РПН;

4) состоянию системы охлаждения.

В настоящее время необходимо вести все расчеты с определением надежности работы трансформаторов и с определением вероятности продолжительности их службы, что позволит оценить допустимость эксплуатации по состоянию трансформатора в целом на основе данных о потоках отказов на рассматриваемом энергетическом предприятии.

Возможность использования парка трансформаторного оборудования с учетом динамики эксплуатационной надежности следует вести по показателям:

– вероятность наступления финальной аварии для каждого трансформатора на разных промежутках времени. (Финальной аварией мы называем технологические нарушения, в результате которых трансформаторное оборудование становится неремонтопригодным);

– вероятность наступления финальных аварий на выбранных сочетаниях трансформаторов на разных промежутках времени;

– вероятная (с заданной вероятностью) продолжительность службы каждой трансформаторной единицы в зависимости от срока его работы и параметров потока технологических отказов;

– ожидаемый ущерб от наступления финальных аварий в заданной группе трансформаторов.

Результаты расчетов, основанные на статистических данных, собранных за последнее десятилетие, показывают, что результаты, получаемые на основе расчетных способов, соответствуют данным эксплуатации, [1, 2].

Теоретические расчеты во многом определяются известными математическими моделями трансформатора. Но существуют отказы, которые не укладываются в известные модели. Так, например, вопросы "отпуска" (ослабления прессовки) сердечников трансформаторов не находят объяснения.

Рассмотрим механические нагрузки, которые действуют на обмотки и сердечник трансформатора при протекании по обмоткам переменного тока.

Как показано в [3], соленоид цилиндрической формы с радиусом поперечного сечения  $R$  при длине  $L \gg R$  в центральной части генерирует магнитное поле с параметрами:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 i \quad \text{при } \rho < R, \\ B &= 0,5\mu_0 i \quad \text{при } \rho = R, \\ B &= 0 \quad \text{при } \rho > R, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  – радиальная координата,  $i$  – поверхностная плотность тока проводимости в обмотке или связанного тока в ферромагнетике.

При этом, независимо от природы тока  $i$ , на поверхности соленоида возникает давление внутреннего распора

$$\bar{p}_R = 0,5\mu_0 i^2 \bar{e}_\rho \quad (2)$$

Проведем рассмотрение этих сил для конкретных конструкций обмоток трансформаторов.

**1. Два коаксиальных соленоида** (обмотки трансформаторов), рис. 1. Для пары концентрических соленоидов с обмотками  $w_1(R_1, i_1)$  и  $w_2(R_2, i_2)$  давления внутреннего распора

$$\begin{aligned} p_1 &= 0,5\mu_0 i_1^2 \\ p_2 &= 0,5\mu_0 i_2^2 \\ p_{21} &= \mu_0 i_1 i_2 \\ p_{12} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{Если } i_1 = i_2, \text{ то } p_1 + p_{21} > p_2 \quad (4)$$

что не является нарушением III закона Ньютона, и для рассматриваемой неконсервативной системы этот закон не приемлем.

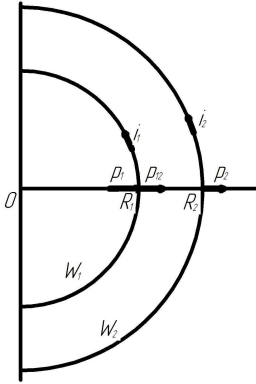


Рис. 1 – Эскиз пары соленоидов.

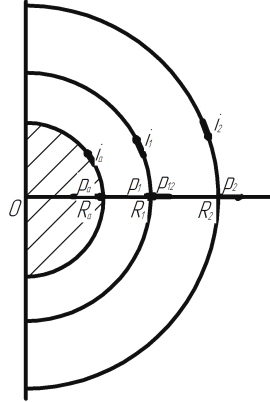


Рис. 2 – Схема поперечного сечения трансформатора.

**2. Ядро трансформатора с магнитным сердечником.** На рис. 2 представлена классическая конструкция схемы поперечного сечения такого трансформатора с двумя облаками  $w_1$  и  $w_2$ .

Здесь основную "нагрузку" по генерации магнитного поля берет на себя ферромагнетик. Например, при  $B_a = 1,6$  Тл  $\mu = 1500$  Гн/м, т.е. при этом  $i_a = B_a / \mu_0 = 1360$  кА/м.

Напряженность поля намагничивания при этом равна

$$H_0 = 1360/1500 = 0,8 \text{ кА/м} \quad (5)$$

Для примера и для качественного анализа силовых взаимодействий (определения давления внутреннего распора) рассмотрим трансформатор с параметрами  $S = 400$  МВА,  $U_1 = 24$  кВ с геометрическими параметрами  $D_a = 10$  м;  $L_a = 2 \cdot 2$  м;  $L_0 = 8$  м;  $S_a \approx 0,71$  м<sup>2</sup>.

В однофазном исполнении  $U_\phi = 24/\sqrt{3} = 13,9$  кВ,  $I_\phi = 400/24 = 16,7$  кА

Число витков первичной обмотки

$$w_1 = \frac{13900}{222 \cdot 1,5 \cdot 0,71} = 55.$$

Рассчитаем значение МДС:  $F_0 = L_0 \cdot H_0 = 6,4$  кА,

$$I_0 = \frac{F_0}{w_1} = \frac{6400}{55} = 116,4 \text{ А}, \text{ что составляет около } 0,7 \% \text{ от номинального}$$

тока.

С учетом потерь в стали  $i_0 < 2$  %. В наших расчетах можно считать, что  $I_1 \approx I_2$ , т.е. при одинаковой схеме соединения обмоток

$$i_1 = i_2 = 230 \text{ кА/м}. \quad (6)$$

Отдельные элементы давления внутреннего распора можно считать:

$$p_a = 0,5 \cdot \mu_0 \cdot 1,36^2 \cdot 10^{12} = 1024 \text{ МПа (10 атм.)}$$

$$p_1 = p_2 = 0,9 \cdot \mu_0 \cdot 2,3^2 \cdot 10^{10} = 36 \text{ МПа (0,36 атм.)}$$

$$p_{21} = \mu_0 \cdot i_1 \cdot i_2 = 2 \cdot p_1; \quad \Sigma p_1 = -p_1$$

Следует отметить, что при другом, так называемом, "сепаратном" – на отдельных стержнях, расположении обмоток на стержнях трансформатора

$$p_1^* = p_2^* = 4 \cdot p_1 = 1300 \text{ МПа (1,3 атм.)}$$

$$p_{12}^* = p_{21}^* = 0$$

### **3. Трансформатор без сердечника, со "сверхпроводящими" обмотками.**

Фактически мы предлагаем рассмотреть трансформатор без стального сердечника, что соответствует варианту выполнения трансформатора со сверхпроводящими обмотками.

Проведем исследования для сверхпроводящего трансформатора при условии сохранения геометрических размеров активной зоны и увеличения числа витков первичной обмотки пропорционально росту плотности тока в обмотке ( $\beta$ ), например  $\beta = 10$ .

В этом случае ток х.х. составит

$$I_0^* = \frac{\mu_r}{\beta} I_0 = \frac{1500}{10^2} 0,7 = 10,5 \text{ \%},$$

что вполне допустимо. Проблемы оптимизации конструкции активной зоны сверхпроводящего трансформатора выходят за рамки тематики настоящей статьи.

#### **Выводы.**

1. При расчете давления внутреннего распора, действующего на катушки и шихтованный сердечник трансформатора, необходимо учитывать конструкцию и расположение этих катушек.

2. При расчете усилий, действующих на обмотки и сердечник, необходимо учитывать действие внутренних электродинамических сил, [4].

3. При разработке конструкций традиционных и сверхпроводниковых трансформаторов необходимо учитывать действие электродинамических сил, приложенных, как к магнитопроводам, так и к обмоткам.

**Список литературы:** 1. *Васин В.П., Долин А.П.* Финальные аварии силовых трансформаторов и анализ эксплуатационной надежности трансформаторного парка // Новое в российской электроэнергетике. – 2013. – № 8. – С. 3-11.  
2. *Шевченко В.В.* Направления деятельности по обеспечению

энергоэффективности энергетики // Мир техники и технологий, № 5 (138), 2013. – С. 26-35. 3. Кузьмин В.В., Шпатенко В.С. К проблеме "нелокального" действия магнитного поля на обмотки электрических машин // Электроинформ, 2005. – №. 4. – С. 14-15. 4. Кузьмин В.В., Лившиц А.Л., Шпатенко Т.В., Шпатенко В.С. Электромеханические процессы в шихтованных магнитопроводах крупных электрических машин – новый подход к описанию явлений и разработке мероприятий по предотвращению появления дефектов // Гидроэнергетика Украины, 2010. – №.4. – С. 27-31.

*Поступила в редколлегию 01.10.2013*



**Кузьмин Виктор Владимирович**, доктор технических наук, проф., лауреат Государственной Премии Украинской ССР в области науки и техники, кавалер "Ордена Дружбы народов", главный специалист АО "ЭЛТА". Защитил диплом инженера, диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1960, 1970 та 1984 гг.

Научные интересы связаны с электроэнергетикой и теоретическими основами электротехники.



**Шевченко Валентина Владимировна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры "Электрические машины" НТУ "ХПИ". В 1977 г. в ХПИ защитила диплом инженера-физика. В 1981 защитила диссертацию в Ленинградском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты. Область научных интересов электроэнергетика, оптимизация параметров и технических характеристик турбогенераторов, нетрадиционная энергетика, сверхпроводимость.



**Шпатенко Виктор Сергеевич**, аспирант. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2010 г.

Научные интересы связаны с исследованием электромагнитных и силовых процессов в крупных синхронных генераторах

#### **УДК 621.314.222**

**Особенности силовых взаимодействий в активной зоне однофазного трансформатора / Кузьмин В.В., Шевченко В.В., Шпатенко В.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2013. – № 51 (1024). – С. 36-42. Бібліогр.: 4 назв.**

На основі нового підходу до розрахунку електродинамічних сил, які виникають в активній зоні, тобто в обмотках і сердечнику однофазного трансформатора, виконали аналіз величини механічних навантажень, що діють на обмотки звичайного і "надпровідного" трансформатора.

**Ключові слова:** трансформатор, механічні навантаження, що діють на обмотку.

On the base of a new approach for the calculation of electrodynamic forces calculation that arise in the active zone i.e. in windings and in the core of the single-phase transformer, the analysis of mechanical loads acting on the coils of ordinary and "superconducting" transformer is performed.

**Keywords:** transformer, mechanical loads acting on the winding.