

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 621.321

Ирина Сергеевна Снитко

ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и промышленной электроники», Россия, Москва, e-mail: snitko@bmstu.ru

Андрей Ильич Тихонов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры физики, Россия, Иваново, e-mail: aitispu@mail.ru

Владислав Евгеньевич Розин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, Россия, Иваново, e-mail: kalmar20006@mail.ru

Арсений Андреевич Башлачев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, e-mail: arsenii.bash@gmail.com

Методика расчета электродинамических усилий в обмотках силовых распределительных трансформаторов с применением имитационных и полевых моделей

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время механические напряжения в обмотках трансформаторов определяются в соответствии с руководящими документами, разработанными для обмоток мощных силовых трансформаторов, выполненных из проводников круглого и прямоугольного сечения. Основным недостатком существующей методики является приближенный учет геометрических особенностей и невозможность распространения ее на ленточные обмотки. Актуальной является задача разработки методики расчета электродинамических усилий в фольговых обмотках силовых распределительных трансформаторов, позволяющей определять радиальные усилия, возникающие при протекании токов короткого замыкания, с учетом эффекта вытеснения тока на поверхность ленточного проводника.

Материалы и методы. Исследование проведено с применением метода конечных элементов для расчета магнитного поля в 2D-постановке и механики твердого тела в 3D-постановке, а также методов имитационного моделирования на основе теории цепей с использованием пакета MatLab Simulink.

Результаты. Предложена методика по расчету электродинамической стойкости ленточных обмоток силовых трансформаторов при коротком замыкании, позволяющая определять как механические напряжения, так и деформации обмоток с учетом эффекта вытеснения тока в ленточном проводнике, а также неравномерного распределения индукции по высоте проводника. Методика апробирована на реальном силовом трансформаторе сухого типа.

Выводы. Разработанная методика может быть использована в качестве подсистемы расширенного поверочного расчета на этапе проектирования силовых трансформаторов, а также в качестве элемента системы диагностики.

Ключевые слова: распределительный трансформатор, имитационное моделирование, электродинамические усилия, динамическая стойкость, короткое замыкание

Irina Sergeevna Snitko

Bauman Moscow State Technical University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electrical Engineering and Industrial Electronics Department, Russia, Moscow, e-mail: snitko@bmstu.ru

Andrey Ilyich Tikhonov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Physics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aitispu@mail.ru

Vladislav Evgenievich Rozin

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate student, Russia, Ivanovo, e-mail: kalmar20006@mail.ru

Arseniy Andreevich Bashlachev

Ivanovo State Power Engineering University, Student, Russia, Ivanovo, e-mail: arsenii.bash@gmail.com

The method of calculating electrodynamic forces in the windings of power distribution transformers using simulation and field models

Abstract

Background. Currently, the mechanical stresses in the windings of transformers are determined in accordance with the guidance documents for the windings of powerful power transformers made of round and rectangular cross-section conductors. The main disadvantage of the current technique is the approximate consideration of geometric features and failure to use it for tape windings. An urgent task is to develop a methodology to calculate electrodynamic forces in foil windings of power distribution transformers, which make it possible to determine the radial forces arising from the flow of short-circuit currents, taking into account the effect of current displacement on the surface of the ribbon conductor.

Materials and methods. The finite element method has been used to calculate the magnetic field in a 2D setting and solid mechanics in a 3D setting, as well as simulation methods based on circuit theory using the MatLab Simulink package.

Results. A method is proposed to calculate the electrodynamic resistance of the ribbon windings of power transformers in case of a short circuit. This method makes it possible to determine both mechanical stresses and deformations of the windings, taking into account the effect of current displacement in the ribbon conductor, as well as the uneven distribution of induction over the height of the conductor. The technique has been tested on a real dry-type power transformer.

Conclusions. The developed technique can be used as a subsystem for extended verification calculations at the design stage of power transformers, as well as an element of a diagnostic system.

Key words: distribution transformer, simulation modeling, electrodynamic forces, dynamic stability, short circuit

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.3.059-067

Введение. Обеспечение электродинамической стойкости обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях (КЗ) является одной из основных задач при проектировании данного электротехнического устройства. Вопросы расчета усилий, возникающих в обмотках силовых трансформаторов при КЗ, посвящено большое количество трудов, в первую очередь Всероссийского электротехнического института (ВЭИ) [1]. Результатами этих исследований являются публикации, а также пакет программ по расчету электродинамической стойкости. Кроме того, разработан и внедрен на все предприятия трансформаторостроения руководящий документ по расчету стойкости трансформаторов при КЗ [2].

Однако имеющиеся методики применимы, в первую очередь, к мощным силовым трансформаторам, для которых проведение натурных испытаний является сложной и затратной задачей, поскольку после данного вида испытаний трансформатор не может эксплуатироваться ввиду возможных деформаций обмоток из-за оказываемых на него воздействий токами КЗ (рис. 1).

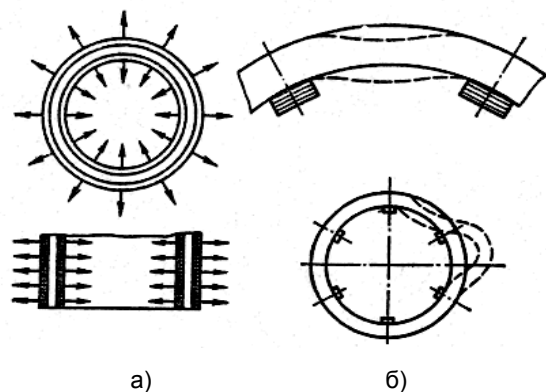


Рис. 1. Осевые и радиальные силы в обмотках (а) и деформации обмоток НН от радиальных сил (б)

Для распределительных трансформаторов I категории (мощностью до 2500 кВА) выполнение таких расчетов считается нецелесообразным [3] ввиду больших объемов производства и относительно низкой стоимости (по сравнению с мощными силовыми трансформаторами). Однако в настоящее время номенклатура силовых распределительных трансформа-

торов в связи с разработкой серий трансформаторов разных классов энергоэффективности расширяется [4], что увеличивает финансовую нагрузку на предприятия-изготовители из-за необходимости выполнения испытаний для каждой модификации. В этих условиях обоснован интерес к использованию имитационного моделирования на всех этапах производственного цикла, включая этап поверочного расчета и натурных испытаний.

Также стоит отметить, что имеющиеся методики расчета электродинамических усилий в обмотках силовых трансформаторов предполагают, что обмотки выполнены из проводников круглого или прямоугольного сечения. Однако в настоящее время большое распространение получили устройства с обмотками низшего напряжения (НН), выполненными из алюминиевой или медной ленты (фольговые обмотки). В этом случае применение методики, описанной в [2], невозможно, а сам расчет электродинамической стойкости обмотки усложняется ввиду сложности электрических и механических процессов, связанных с неравномерностью распределения тока по высоте обмотки НН, а также ввиду необходимости решения задачи из области сопротивления материалов для расчета механических напряжений и деформаций многослойного ленточного проводника.

В связи с этим актуальной является задача разработки методики анализа электродинамической стойкости обмоток силового трансформатора, позволяющей на этапе проектирования анализировать усилия, механические напряжения и деформации, возникающие в обмотках, выполненных из ленты, выявлять недостатки разработанной конструкции и, как следствие, уменьшать число неуспешных испытаний, вызванных этими недостатками.

Методы исследования. Расчет электродинамической стойкости обмоток заключается в определении осевых, радиальных и тангенциальных усилий, механических напряжений и деформаций. При рассмотрении силовых распределительных трансформаторов можно пренебречь тангенциальной составляющей силы, так как эти силы незначительны, а деформации обмоток из ленты, вызванные данными силами, практически не влияют на надежность работы трансформатора [5].

При рассмотрении обмоток, выполненных из провода, большое значение имеют осевые усилия, оказывающие влияние на каждую обмотку. Суммируясь по виткам вдоль обмотки, эти силы создают усилия на торцах обмотки и механические напряжения сжатия в витковой изоляции, что приводит к разрушению концевой изоляции обмоток, повреждению прессующего кольца и деформации прессующей балки [6]. В [7] обосновано, что наиболее слабым местом является концевая изоляция обмотки НН.

Кроме того, приведена методика расчета осевых усилий в обмотках распределительных трансформаторов с учетом их геометрических особенностей.

Однако при рассмотрении обмоток НН, выполненных из ленты, нет необходимости в расчете осевых сил ввиду практического отсутствия осевых деформаций отдельных проводников по высоте.

В [8] приводится методика определения радиальных усилий для внутренних обмоток трансформаторов (в случае распределительных трансформаторов – обмоток НН). Однако она разработана для мощных силовых трансформаторов, обмотки которых выполнены из проводов, а не металлической ленты.

Предлагаемая нами методика направлена на определение радиальных усилий, возникающих при протекании токов КЗ по обмоткам силовых трансформаторов, выполненных из ленты.

Расчет электродинамической стойкости обмоток из ленты состоит из следующих основных этапов [5]:

- расчет тока КЗ;
- расчет магнитного поля;
- определение электродинамических сил, действующих в обмотках;
- нахождение распределения механических напряжений и деформаций под действием этих сил;
- анализ прочности и устойчивости (деформации) обмоток по результатам сопоставления рассчитанных и допустимых механических напряжений.

Расчет тока КЗ предполагает определение ударного тока КЗ, что является трудоемкой задачей при аналитическом расчете [9, 10], поскольку необходимо учитывать как добавочные потери в трансформаторах [11], так и изменение сопротивления обмоток, обусловленное температурой окружающей среды и протекающими токами [12].

В связи с этим целесообразно использовать имитационные модели, позволяющие учитывать изменение параметров силовых трансформаторов в зависимости от большого числа факторов [13, 14].

Расчет магнитного поля предполагает определение распределения осевой и радиальной составляющих индукции магнитного поля для момента времени, соответствующего протеканию ударного тока КЗ по обмоткам. Для этого целесообразно использовать конечно-элементные модели (КЭМ), например [15, 16]. Стоит отметить, что в случае распределительных трансформаторов со стандартной конструкцией обмоток (цилиндрические концентрические) целесообразно использование двумерных осесимметричных моделей [17], позволяющих с высокой точностью и быстродействием решать поставленную полевую задачу.

Расчет электродинамических сил – расчет прочности внутренних обмоток трансформаторов при действии радиальных усилий короткого замыкания – можно вести, как отмечается в [18, 19], на модели, представляющей собой сегмент кольца обмотки (рис. 2), располагающийся между двумя рейками. Шириной реек при этом можно пренебречь без особых потерь точности.

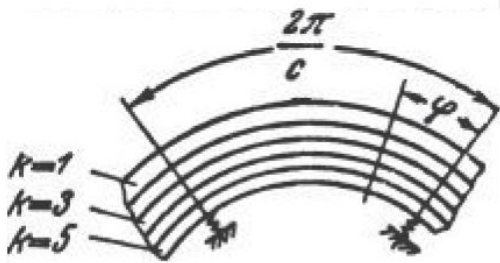


Рис. 2. Фрагмент расчетной области для моделирования напряжений и деформаций внутренних обмоток трансформатора

Величина распределенной силы, действующей на фрагмент элементарного тонкого витка обмотки радиусом r (рис. 2), может быть найдена по формуле

$$F_r(r) = iB_x \frac{2\pi r}{N_p}, \quad (1)$$

где i – ток, протекающий по витку, равный ударному току КЗ данной обмотки; B_x – величина индукции в сечении обмотки, расположенном на расстоянии r от оси стержня; N_p – количество реек между обмоткой и стержнем (в случае ОНН).

Обмотку, состоящую из множества витков, можно представить некоей монолитной средой, характеризующейся приведенными параметрами, учитывающими распределенный характер среды. Массив обмотки можно разделить на отдельные фрагменты, соответствующие слоям (виткам) обмотки.

Расчет распределенной радиальной силы, действующей на расчетный фрагмент обмотки, заключенный между двумя соседними рейками, можно вести по формуле

$$F_r = iW \frac{1}{N_p N_s} \sum_{k=1}^{N_s} 2\pi r_k B_{xk}(r_k), \quad (2)$$

где k – номер расчетного сечения, в котором определяется величина составляющей индукции $B_{xk}(r_k)$; r_k – средний радиус k -го сечения; N_s – количество расчетных сечений (чем больше, тем точнее).

Так как по высоте цилиндра обмотки величина магнитной индукции меняется (при учете эффекта вытеснения тока по высоте меняется и величина плотности тока), то целесообразно разбить обмотки по высоте на несколько расчетных колец, в пределах которых величину радиальной силы можно принять равной усредненному значению по формуле

$$F_r(x) = iW \frac{1}{N_p N_s} \times \sum_{k=1}^{N_s} \left[\frac{2\pi r_k}{\Delta L} \sum_{j=1}^{N_s} \left(\frac{2\pi r_k}{\Delta L} B_{xkj}(r_k, x_j) \Delta x \right) \right], \quad (3)$$

где ΔL – ширина расчетного кольца, разбитого по высоте на N_j фрагментов высотой Δx ; B_{xkj} – осевая составляющая магнитной индукции в k -м сечении на j -м элементарном участке по высоте.

Поскольку методика разрабатывается для распределительных трансформаторов с фольговыми обмотками, необходимо учитывать неравномерное распределение тока по обмотке вследствие поверхностного эффекта [20], поскольку, очевидно, он будет оказывать существенное влияние на распределение сил по высоте обмотки.

Расчет распределения механических напряжений и деформаций, возникающих при действии электродинамических сил, представляет собой сложную мультифизическую задачу из области сопротивления материалов.

Следовательно, для решения данной задачи целесообразно использовать программные пакеты для мультифизического моделирования, использующие МКЭ и обладающие удобным графическим интерфейсом.

При построении модели рассматривается сегмент обмотки НН, расположенный между двумя рейками, равномерно разделенный на секции по высоте для учета неравномерного распределения индукции по высоте обмотки (рис. 3).

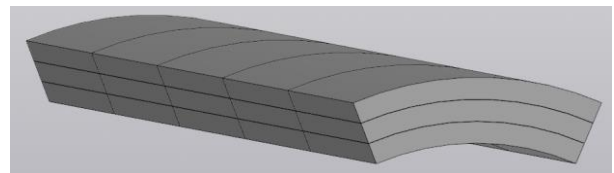


Рис. 3. Сегмент обмотки для расчета механических напряжений, возникающих при действии усилий

После создания трехмерной модели задаются свойства материала, из которого выполнена обмотка и граничные условия: жесткая заделка по краям сегмента, что соответствует местам расклинивания рейками, а также приложенные силы, рассчитанные ранее, прижимающие обмотку к стержню (рис. 4).

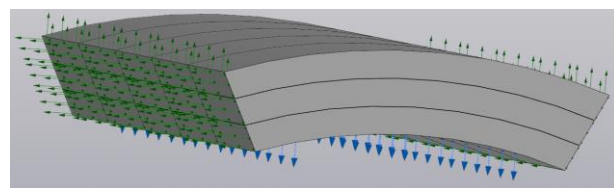


Рис. 4. Граничные условия (заделки) и усилия, приложенные к выделенным поверхностям модели

Далее строится конечно-элементная сетка и выполняется расчет. По результатам расчета необходимо оценить полученные деформации, а также сравнить рассчитанные внутренние напряжения с пределом текучести материала.

Результаты исследований. Для апробации методики был выбран сухой силовой трансформатор мощностью 1000 кВА класса напряжения 6/0,4 кВ с обмоткой НН, выполненной из медной ленты.

На данном этапе исследований не было учтено неравномерное распределение тока по высоте обмотки ввиду значительного усложнения расчетов на этапе определения параметров обмоток и решения полевой задачи.

На имитационной модели (рис. 5) был проведен опыт трехфазного КЗ, по результатам которого получены кривые изменения фазных токов обмотки высокого (рис. 6,а) и низкого (рис. 6,б) напряжения, по которым определены значения ударного тока КЗ для обеих обмоток. В имитационной модели были учтены взаимные индуктивности по полям за пределами магнитопровода.

С использованием полученных значений ударных токов была рассмотрена полевая задача по расчету магнитного поля обмоток при протекании по ним ударных токов КЗ (в момент времени $t = 0,008$ с) (рис. 7). По результатам данного расчета получено распределение радиальных и осевых составляющих индукции для обмоток ВН и НН (рис. 8).

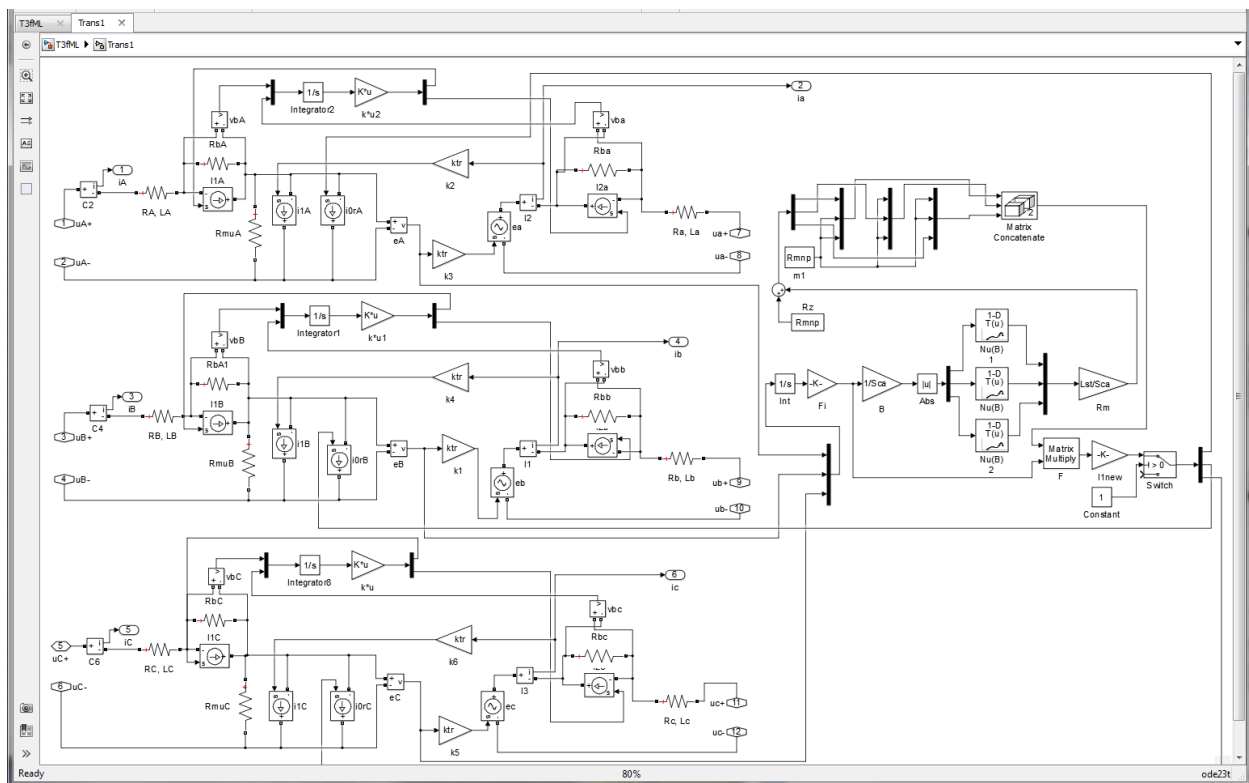


Рис. 5. Имитационная модель трансформатора

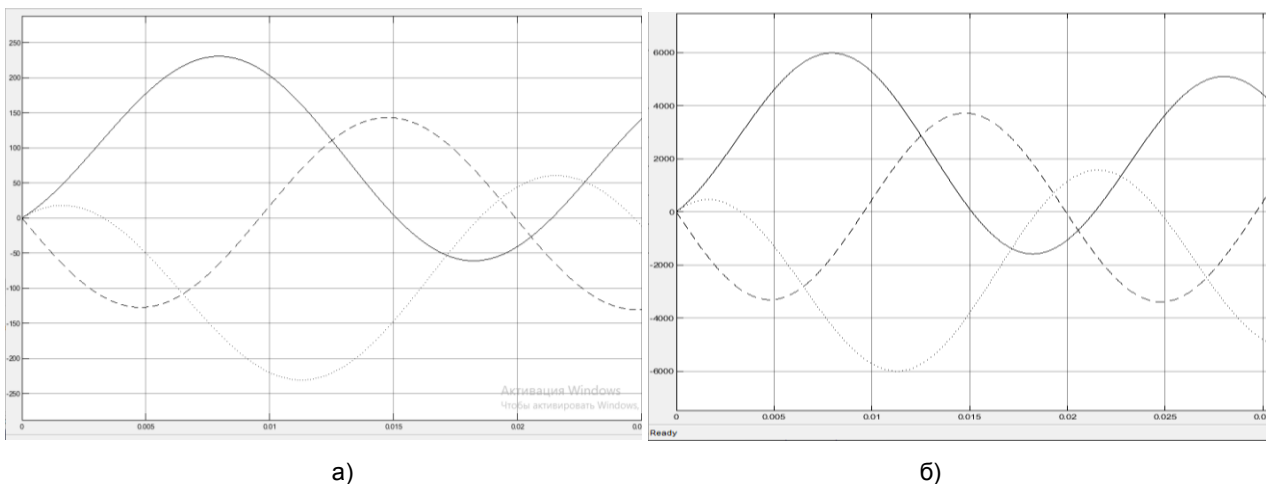


Рис. 6. Кривые изменения токов обмоток ВН (а) и НН (б) в режиме КЗ

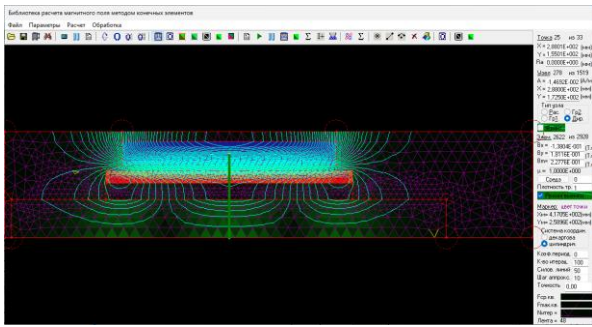


Рис. 7. Поле рассеяния в режиме КЗ при $t = 0,008$ с

Исходя их формы распределения осевой составляющей магнитной индукции по высоте обмотки НН, целесообразно разбить ее на 14 секций по высоте, в пределах которых использовать усредненное значение магнитной индукции.

Для определения сил, сжимающих обмотку, и дальнейшего расчета механических напряжений было рассмотрено три случая представления обмотки (рис. 9): без разбиения на слои (монокристаллический сегмент), с разбиением на 4 слоя равной толщины, а также с разбиением на число слоев, соответствующее числу витков (20 для рассматриваемой обмотки).

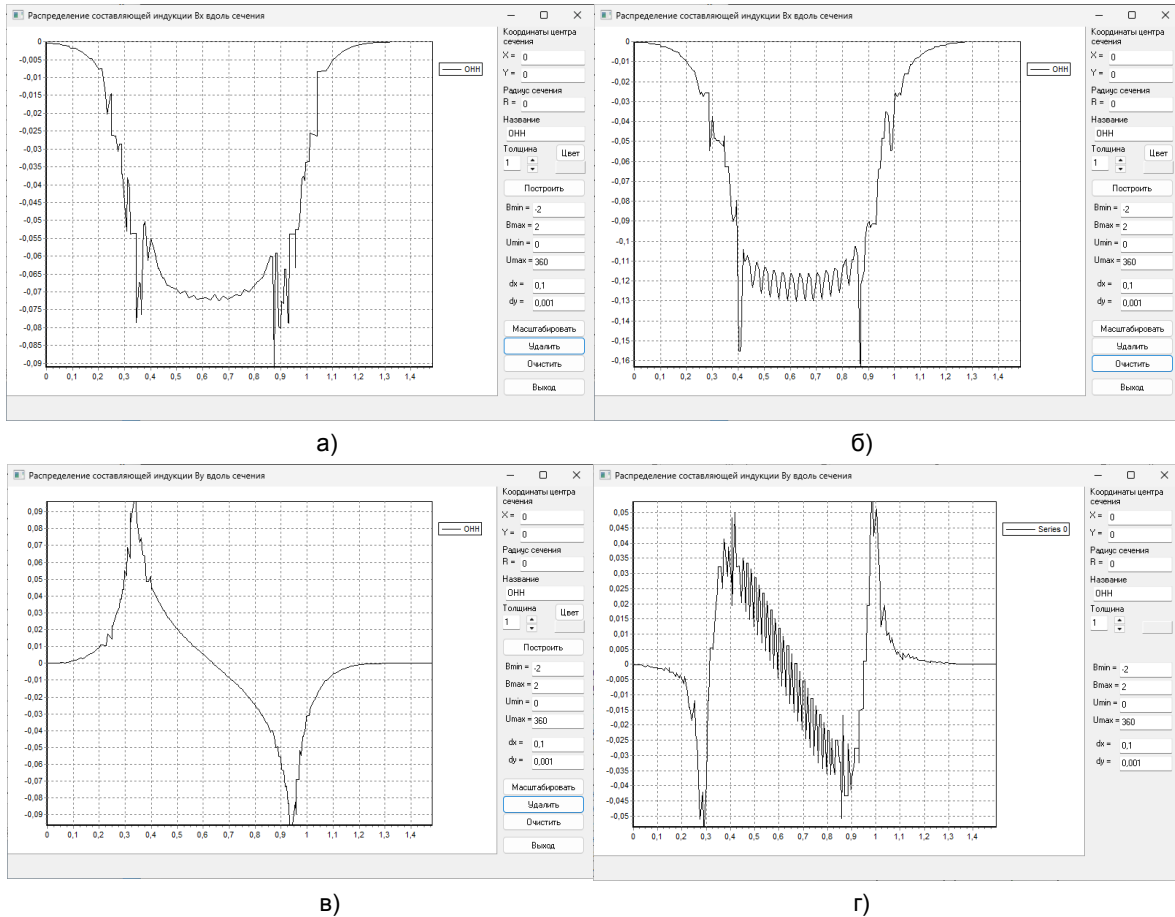


Рис. 8. Зависимости составляющих индукции для обмоток: осевая составляющая для обмоток ВН (а) и НН (б); радиальная составляющая для обмоток ВН (в) и НН (г)

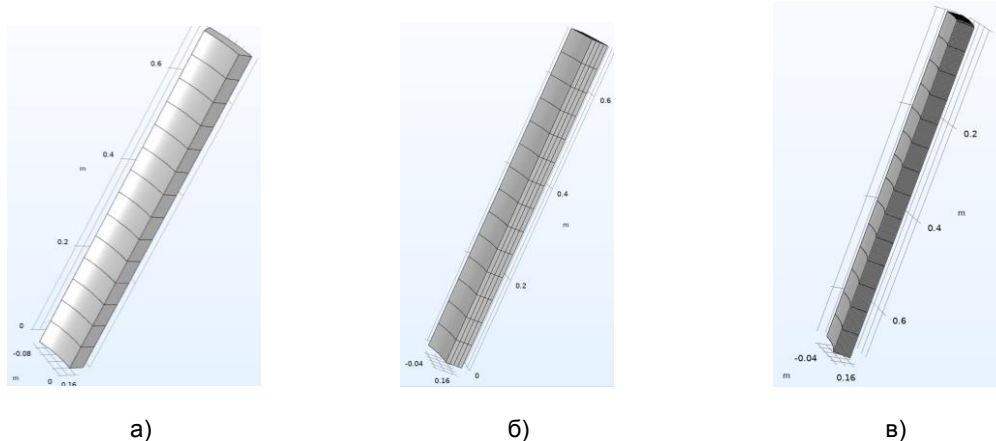


Рис. 9. Сегмент обмотки для расчета механических напряжений с различным числом слоев: а – один слой; б – четыре; в – двадцать

Распределение радиальной силы, действующей на ближайший к стержню виток, по высоте обмотки (в зависимости от номера секции, нумеруемых сверху вниз) для случая учета обмотки одним слоем (кривая 1) приведено на рис. 10. Схожие результаты были получены для случаев разбиения на 4 и 20 слоев (кривая 2). Значения радиальных сил для различных случаев разбиения различаются не более чем на 10 %, что обусловлено усредненным значением определяемой силы для случая отсутствия разбиения обмотки на слои.

Рассчитанные силы были приложены к моделям, представленным на рис. 9. На рис. 11 приведены результаты расчета моделей, а на рис. 12 – распределение механических напряжений и деформаций для случаев одного и двадцати расчетных слоев.

Значения, полученные в результате моделирования, были сопоставлены со значениями расчета радиальной силы, определенной по методике [2]. Результаты сведены в таблицу.

По результатам расчета можно сделать вывод о допустимости полученных механических напряжений, поскольку они не превышают предел текучести для материала обмотки. Деформации обмоток также находятся в допустимых пределах, а механические напряжения меньше предела текучести алюминия.

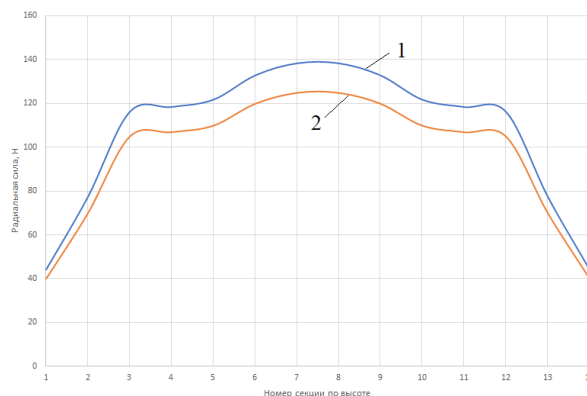


Рис. 10. Распределение электродинамической силы по высоте обмотки НН: 1 – без разбиения на слои (кривая 1); 2 – при разбиении на 20 слоев (кривая 2)

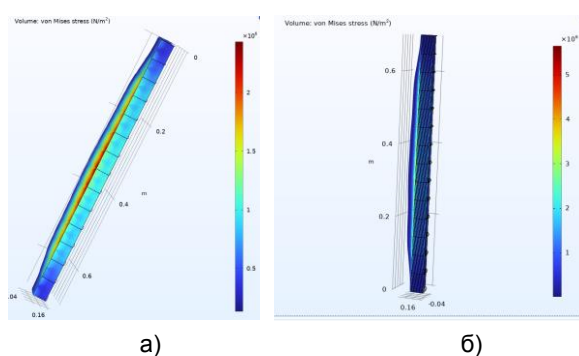


Рис. 11. Результаты моделирования при приложении электродинамических усилий к сегменту обмотки для случаев представления обмотки: а – одним слоем; б – двадцатью слоями

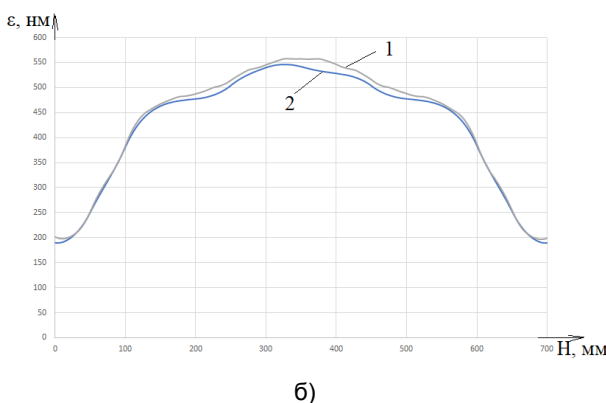
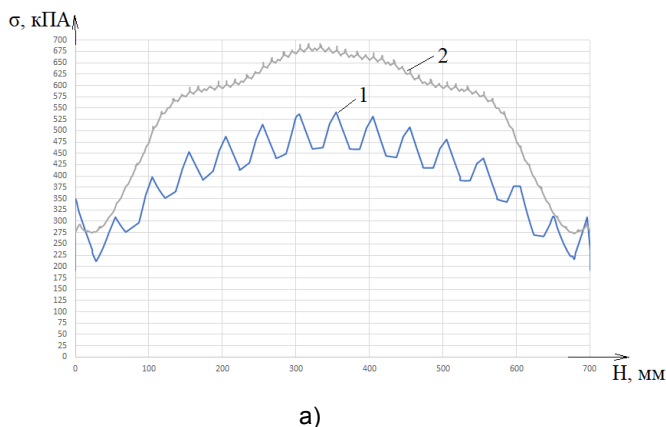


Рис. 12. Результаты расчета механических напряжений (а) и деформаций (б) для моделей сегмента обмотки при представлении обмотки одним слоем (кривая 1) и 20 слоями (кривая 2)

Результаты расчета механических напряжений в фольговой обмотке силового распределительного трансформатора

Методика расчета	РД 16.431-88 [2]	Методика с использованием цепных и полевых моделей		
		один слой	разбиение на 4 слоя	разбиение на 20 слоев
Механическое напряжение, кПа	597,86	525	660	675

Значения механических напряжений, полученные на моделях с разной степенью разбиения, различаются не более чем на 20 %. Причем предлагаемая нами методика дает результаты, идентичные апробированной методике [2] –

расхождение при одинаковых условиях расчета не превышает 10 %.

Выводы. Предложенная методика расчета электродинамической стойкости обмоток низшего напряжения распределительного

силового трансформатора, выполненных из ленты, позволяет с использованием ряда моделей определять радиальные электродинамические усилия при протекании ударного тока КЗ, а также механических напряжений и деформаций элементов обмотки. Для детального учета механики твердого тела использовано разбиение обмотки на число сегментов, равное числу опорных реек для каждого слоя обмотки.

Дальнейшее развитие данной методики предполагает учет неравномерного распределения тока ввиду эффекта вытеснения тока по высоте обмотки, выполненной из ленты.

Разработанная методика может быть использована в качестве подсистемы расширенного поверочного расчета на этапе проектирования силовых трансформаторов, а также в качестве элемента системы диагностики силовых трансформаторов для определения вероятности повреждений обмотки в режиме короткого замыкания.

Список литературы

1. **Лурье А.И.** Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при КЗ: сб. статей / под ред. А.И. Лурье. – М.: Знак, 2005.
2. **РД 16.431-88.** Трансформаторы силовые. Расчет электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании.
3. **ГОСТ Р 55188—2012 (МЭК 60076-5:2006).** Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям.
4. **Савинцев Ю.М.** Выбор поставщика – элемент стратегии внедрения энергоэффективных трансформаторов // Энергия единой сети. – 2019. – № 2(44). – С. 48–56.
5. **Лурье А.И.** Электродинамическая стойкость трансформаторов при коротких замыканиях // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / под ред. А.И. Лурье. – М.: Знак, 2005. – С. 8–48.
6. **Лурье С.И., Савельев М.П.** Динамические осевые усилия в обмотках трансформаторов // Электричество. – 1972. – № 6.
7. **Лурье А.И., Левицкая Е.И.** Электродинамическая стойкость трансформаторов I-II габаритов со слоевыми цилиндрическими обмотками // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / под ред. А.И. Лурье. – М.: Знак, 2005. – С. 177–185.
8. **Мильман Л.И., Лурье С.И.** Расчет внутренних обмоток трансформаторов на прочность с учетом конечной ширины реек // Электричество. – 1971. – № 9. – С. 10–16.
9. **Лурье А.И.** Об определении максимального тока при включении цепи RL на переменное напряжение // Электричество. – 1997. – № 12. – С. 23–29.
10. **К расчету** токов короткого замыкания трансформаторов / В.П. Зенова, А.И. Лурье, Г.А. Славин, Л.Н. Шифрин // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / под ред. А.И. Лурье. – М.: Знак, 2005. – С. 78–84.
11. **Лурье А.И.** Ударный ток трансформаторов и реакторов при коротком замыкании с учетом добавочных потерь // Электричество. – 2001. – № 2.

12. **Ларин В.С., Горшунов В.Ю.** Особенности испытаний распределительных трансформаторов на стойкость при коротких замыканиях // Электротехника. – 2018. – № 10. – С. 75–81.

13. **Снитко И.С., Тихонов А.И.** Уточнение активных сопротивлений силового трансформатора по результатам расчета полевых моделей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 23–40.

14. **Создание** цифровых двойников силовых трансформаторов на основе имитационных моделей и их использование в САПР / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.С. Снитко, А.В. Подобный. – Иваново, 2023. – 124 с.

15. **Брилинский А.С., Евдокунин, Г.А., Попов И.В.** Современные методы расчета электродинамических усилий в обмотках силовых трансформаторов // Известия НТЦ Единой энергетической системы. – 2023. – № 1(88). – С. 101–105.

16. **Разработка** 2D-моделей магнитного поля для реализации технологии цифровых двойников и порождающего проектирования силовых трансформаторов / А.И. Тихонов, А.В. Стулов, И.С. Снитко, А.В. Подобный // Вестник ИГЭУ. – 2020. – Вып. 3. – С. 32–43.

17. **Снитко И.С.** Разработка методики расширенного поверочного расчета в САПР силовых трансформаторов на базе имитационных моделей: специальность 05.13.12 «Системы автоматизации проектирования (по отраслям)»: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2022. – 154 с.

18. **Мильман Л.И., Лурье А.И.** Расчет внутренних обмоток трансформаторов на прочность с учетом конечной ширины реек // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / под ред. А.И. Лурье. – М.: Знак, 2005. – С. 241–250.

19. **Мильман Л.И., Лурье А.И.** Расчет прочности внутренних обмоток трансформаторов при действии радиальных усилий короткого замыкания // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях / под ред. А.И. Лурье. – М.: Знак, 2005. – С. 229–240.

References

1. Lur'e, A.I. *Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov i reaktorov pri KZ: sbornik statey* [Electrodynamic stability of transformers and reactors at short circuit: Collection of articles]. Moscow: Znak, 2005.
2. RD 16.431-88. *Transformatory silovyye. Raschet elektrodinamicheskoy stoykosti obmotok pri korotkom zamykanii* [Power transformers. Calculation of the electrodynamic resistance of windings in case of short circuit].
3. GOST R 55188-2012 (IEC 60076-5:2006). *Transformatory silovyye. Stoykost' k korotkim zamykaniyam* [Power transformers. Resistance to short circuits].
4. Savintsev, Yu.M. *Vybor postavshchika – element strategii vnedreniya energoeffektivnykh transformatorov* [Supplier selection is an element of the strategy for the introduction of energy-efficient transformers]. *Energiya edinoi seti*, 2019, no. 2(44), pp. 48–56.
5. Lur'e, A.I. *Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov pri korotkikh zamykaniyakh* [Electrodynamic resistance of transformers in short circuits].

Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov i reaktorov pri korotkikh zamykaniyakh [Electrodynamic resistance of transformers and reactors in short circuits]. Moscow: Znak, 2005, pp. 8–48.

6. Lur'e, S.I., Savel'ev, M.P. Dinamicheskie oseyve usiliya v obmotkakh transformatorov [Dynamic axial forces in windings transformers]. *Elektrichestvo*, 1972, no. 6.

7. Lur'e, A.I., Levitskaya, E.I. Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov I-II gabaritov so sloevymi tsilindricheskimi obmotkami [Electrodynamic stability of transformers of I-II dimensions with layered cylindrical windings]. *Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov i reaktorov pri korotkikh zamykaniyakh* [Electrodynamic resistance of transformers and reactors in short circuits]. Moscow: Znak, 2005, pp. 177–185.

8. Mil'man, L.I., Lur'e, S.I. Raschet vnutrennikh obmotok transformatorov na prochnost' s uchedom konechnoy shiriny reek [Calculation of internal transformer windings for strength, taking into account the final width of the rails]. *Elektrichestvo*, 1971, JB9, pp. 10–16.

9. Lur'e, A.I. Ob opredelenii maksimal'nogo toka pri vklyuchenii tsepi RL na peremennoe napryazhenie [On determining the maximum current when the RL circuit is switched on for alternating voltage]. *Elektrichestvo*, 1997, no. 12, pp. 23–29.

10. Zenova, V.P., Lur'e, A.I., Slavin, G.A., Shifrin, L.N. K raschetu tokov korotkogo zamykaniya transformatorov [On the calculation of short-circuit currents of transformers]. *Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov i reaktorov pri korotkikh zamykaniyakh* [Electrodynamic resistance of transformers and reactors in short circuits]. Moscow: Znak, 2005, pp. 78–84.

11. Lur'e, A.I. Udarnyy tok transformatorov i reaktorov pri korotkom zamykanii s uchedom dobavochnykh poter' [Shock current of transformers and reactors in case of short circuit, taking into account additional losses]. *Elektrichestvo*, 2001, no. 2.

12. Larin, V.S., Gorshunov, V.Yu. Osobennosti ispytaniy raspredelitel'nykh transformatorov na stoykost' pri korotkikh zamykaniyakh [Features of testing distribution transformers for resistance to short circuits]. *Elektrotehnika*, 2018, no. 10, pp. 75–81.

13. Snit'ko, I.S., Tikhonov, A.I. Utochnenie aktivnykh soprotivleniy silovogo transformatora po rezul'tatam rascheta polevykh modeley [Refinement of the active resistances of a power transformer based on the results of calculating field models]. *Vestnik Permskogo*

natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya, 2024, no. 50, pp. 23–40.

14. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Snit'ko, I.S., Podobnyy, A.V. Sozdanie tsifrovyykh dvoynikov silovykh transformatorov na osnove imitatsionnykh modeley i ikh ispol'zovanie v SAPR [Creation of digital counterparts of power transformers based on simulation models and their use in CAD]. Ivanovo, 2023. 124 p.

15. Brilinskiy, A.S., Evdokunin, G.A., Popov, I.V. Sovremennyye metody rascheta elektrodinamicheskikh usiliy v obmotkakh silovykh transformatorov [Modern methods for calculating electrodynamic forces in windings of power transformers]. *Izvestiya NTTs Edinoy energeticheskoy sistemy*, 2023, no. 1(88), pp. 101–105.

16. Tikhonov, A.I., Stulov, A.V., Snit'ko, I.S., Podobnyy, A.V. Razrabotka 2D-modeley magnitnogo polya dlya realizatsii tekhnologii tsifrovyykh dvoynikov i porozhdayushchego proektirovaniya silovykh transformatorov [Development of 2D magnetic field models for the implementation of digital twin technology and threshold design of power transformers]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 3, pp. 32–43.

17. Snit'ko, I.S. *Razrabotka metodiki rasshirenogo poverochnogo rascheta v SAPR silovykh transformatorov na baze imitatsionnykh modeley*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Development of methods of extended verification calculation in CAD of power transformers based on simulation models. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2022. 154 p.

18. Mil'man, L.I., Lur'e, A.I. Raschet vnutrennikh obmotok transformatorov na prochnost' s uchedom konechnoy shiriny reek [Calculation of the internal windings of transformers for strength, taking into account the finite width of the rails]. *Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov i reaktorov pri korotkikh zamykaniyakh* [Electrodynamic resistance of transformers and reactors in short circuits]. Moscow: Znak, 2005, pp. 241–250.

19. Mil'man, L.I., Lur'e, A.I. Raschet prochnosti vnutrennikh obmotok transformatorov pri deystvii radial'nykh usiliy korotkogo zamykaniya [Calculation of the strength of the inner windings of transformers under the action of radial short-circuit forces]. *Elektrodinamicheskaya stoykost' transformatorov i reaktorov pri korotkikh zamykaniyakh* [Electrodynamic resistance of transformers and reactors during short circuits]. Moscow: Znak, 2005, pp. 229–240.