

УДК 621.314.2

ЧИСЛЕННИЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ, МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MATLAB/SIMULINK И COMSOL

А.Д.Подольцев¹, докт.техн.наук, Л.Н.Конторович², канд.техн.наук,
¹ – Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,
² – ОАО «Запорожтрансформатор», Днепрпетровское шоссе, 3, Запорожье, 69600, Украина.

Предложен подход к моделированию электромагнитных процессов в силовом трансформаторе в аварийных режимах, включающий расчет мгновенных значений электрических токов в обмотках трансформатора в пакете Matlab/Simulink, расчет магнитного поля в активной зоне трансформатора и распределения электродинамических сил в его обмотках с помощью программы Comsol. Рассмотрены три аварийных режима работы трансформатора применительно к конкретной электрической сети – включение трансформатора с насыщенным магнитопроводом на холостом ходу, однофазное и трехфазное КЗ в нагрузке. Показано, что максимальные силовые нагрузки в обмотках реализуются в режиме трехфазного КЗ, а минимальные – однофазного КЗ. Библи. 8, табл. 1, рис. 9.

Ключевые слова: силовой трансформатор, токи включения, токи короткого замыкания, магнитное поле, Matlab/Simulink, Comsol.

Силовые трансформаторы (СТ) являются основными преобразователями параметров электрической энергии в современных энергосистемах. В рабочем цикле СТ наряду с номинальным режимом можно выделить ряд динамических аварийных режимов таких, как включение в произвольный момент времени трансформатора на холостом ходу, однофазное и трехфазное короткое замыкание (КЗ) и др., при которых в его обмотках достигаются максимальные электромагнитные нагрузки. Уровень этих нагрузок необходимо учитывать как на этапе проектирования СТ, так и при реализации безопасных режимов его эксплуатации в энергосистеме. При таком подходе к проектированию и эксплуатации СТ выбранному проектному решению должны предшествовать исследования электромагнитных процессов в СТ не только в нормальном эксплуатационном режиме, но и в разного рода аварийных режимах с учетом структуры и электрических свойств конкретной энергосистемы, в которой предположительно этот трансформатор будет эксплуатироваться, а также различных мест возникновения КЗ. Для проведения таких исследований целесообразно использовать современные средства компьютерного моделирования.

В настоящее время для оценки токов КЗ и возникающих при этом электродинамических сил используются аналитические выражения, полученные А.И.Лурье и приведенные, например, в работе [7]. Более детальный анализ токов в обмотках трансформатора выполняется по методике, описанной в [1], в которой обмотка представляется в виде многоэлементной электрической схемы замещения с *RLC* элементами. Для расчета значений собственных и взаимных индуктивностей элементов обмотки используются выражения из [2]. Такой подход на основе теории цепей не учитывает сложную картину распределения магнитного поля в обмотках. В приведенных работах при расчете токов КЗ также не учитывается реальная конфигурация и параметры электрической сети, в которой находится этот СТ, и влияние места возникновения КЗ на линии электропередачи на токи в трансформаторе.

Наряду с использованием описанных выше подходов, в последнее время для решения различных задач электротехники все большую популярность приобретают пакеты программ Matlab/Simulink/SimPowerSystems (для расчета сложных электрических цепей и электроэнергетических систем [6]) и Comsol (для расчета электромагнитного поля в силовом оборудовании [8]). В связи с этим целесообразно разработать подход к моделированию электромагнитных процессов и магнитного поля в СТ именно с использованием этих двух пакетов программ. Отметим, что наряду с пакетом Comsol, применение пакета ANSYS также является перспективным для моделирования электротехники.

тромагнитного поля в силовых трансформаторах (см., например, работу [3]).

Целью данной статьи является разработка подхода к моделированию и расчету электромагнитных процессов, трехмерного магнитного поля и электродинамических сил в обмотках силового трансформатора в аварийных режимах в компьютерной среде Matlab/Simulink/SimPowerSystem и Comsol. Особенностью работы является учет нелинейных свойств магнитопровода и наличие остаточной индукции при включении СТ на холостом ходу, а также возможность учета сложной структуры электрической сети, в которой установлен этот СТ, и различного места возникновения КЗ на линии электропередачи.

Отметим, что задачи расчета изменяющихся во времени электрических токов в цепи трансформатора и зависящего от этих токов магнитного поля в этом трансформаторе являются связанными и в общем случае должны решаться одновременно. Однако в ряде случаев такую связь можно рассматривать как слабую, что позволяет при решении общей задачи сначала выполнить расчет электрических токов в обмотках в рамках теории цепей, а затем рассчитать магнитное поле и распределение электродинамических сил по полученным значениям токов, т.е. использовать двухэтапный подход, который и реализован в данной работе. В рамках такого подхода необходимо реализовать следующее.

На первом этапе выполнить расчет в пакете Matlab/Simulink/SimPowerSystems переходных процессов в электрической сети, в которой наряду с различным силовым энергетическим оборудованием содержится и исследуемый силовой трансформатор, представленный стандартной Simulink-моделью. По результатам этих расчетов определить мгновенные значения электрических токов в обмотках трансформатора в критический момент времени, соответствующий максимальному значению токов в обмотках.

На втором этапе по полученным значениям мгновенных токов выполнить расчет в пакете Comsol трехмерного магнитного поля в активной зоне силового трансформатора и электродинамических сил, действующих на его обмотки в этот момент времени.

В качестве аварийных режимов работы СТ в данной работе рассматриваются следующие три режима: 1) включение в сеть трансформатора с насыщенным магнитопроводом на холостом ходу, 2) режим однофазного КЗ в нагрузке и 3) режим трехфазного КЗ в нагрузке. Далее описываются результаты моделирования сначала по этапу 1 и затем по этапу 2. Отметим, что описанный подход может использоваться как для комплексных, так и мгновенных значений токов, причем те и другие могут быть получены на этапе 1 с помощью Simulink-модели всей системы. Далее будут использоваться только мгновенные значения токов в обмотках.

Моделирование аварийных режимов работы в электрической сети при наличии силового трансформатора. Для анализа различных режимов работы исследуемого трансформатора была разработана Simulink-модель типового фрагмента электрической сети (рис. 1), который содержит модели следующих основных элементов (показаны слева направо):

- источника трехфазного напряжения с глухозаземленной нейтралью;
- трехфазного блока RL , задающего эквивалентные внутренние параметры источника и линии электропередачи на участке от источника до трансформатора;
- блока измерения трехфазного напряжения и тока $B1$;
- трехфазного коммутатора;
- исследуемого трехфазного трансформатора 225 кВА, 2400/600 В (взят из примера пакета Matlab/Simulink).

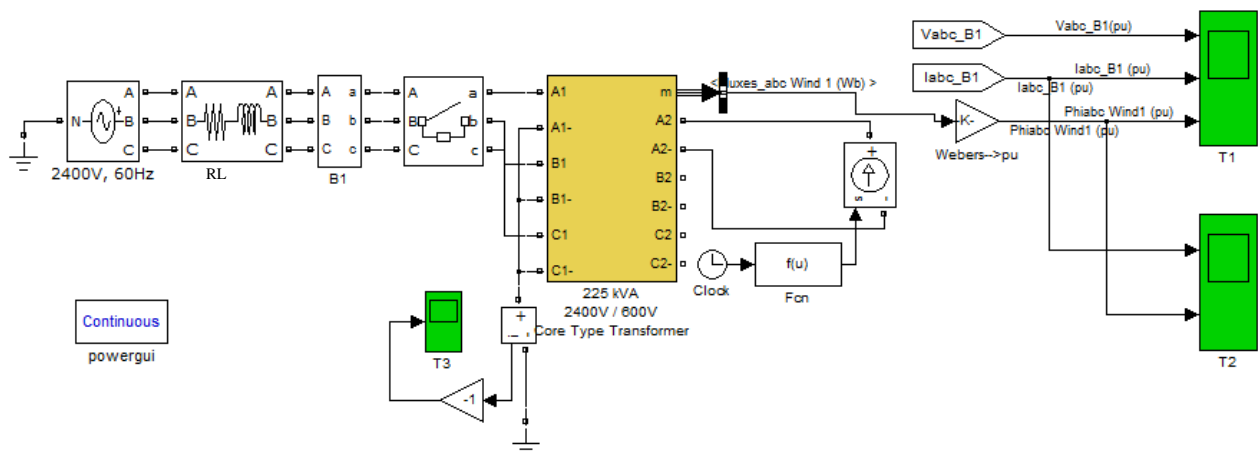


Рис. 1

Здесь также содержатся средства визуализации мгновенных значений токов и напряжений на входе в трансформатор и величины магнитной индукции в стержнях его магнитопровода.

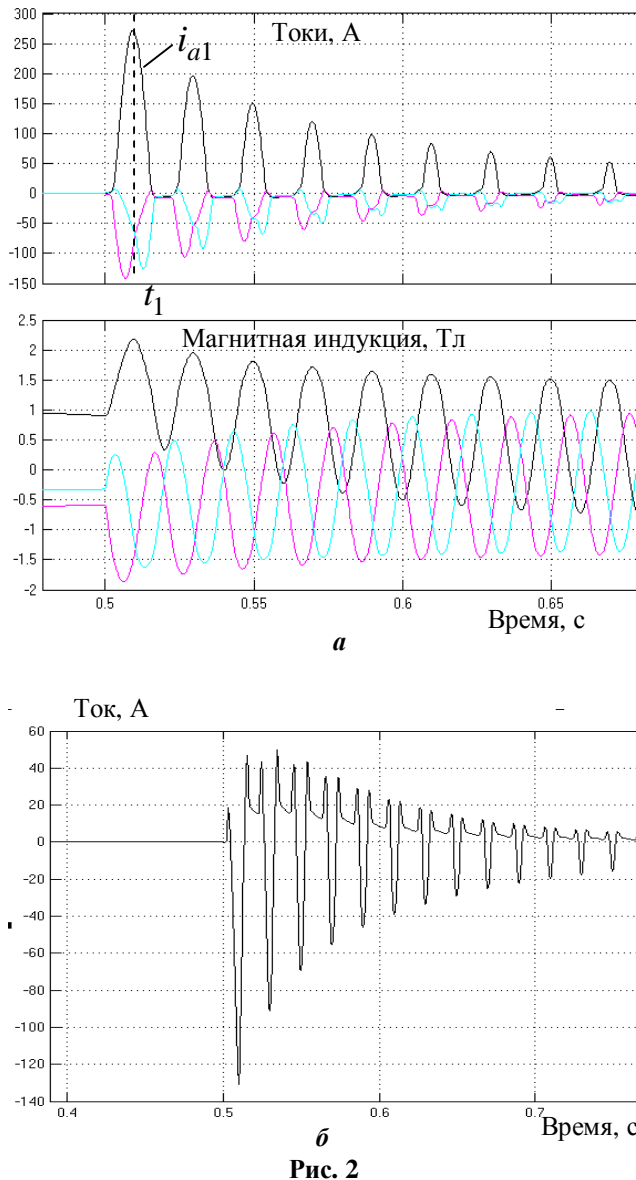


Рис. 2

времени по проводу, соединяющему нулевую точку обмоток СТ с землей. Компьютерная осциллограмма этого тока на рис. 2, б показывает, что его форма значительно отличается от синусоидальной.

Режим однофазного и трехфазного короткого замыкания в нагрузке. Simulink-модель электрической

Режим работы	i_{a1} , А	i_{b1} , А	i_{c1} , А	i_{a2} , А	i_{b2} , А	i_{c2} , А
Включение на холостом ходу при $B_r = 0,9$ Тл	275	-100	-45	-	-	-
Однофазное КЗ	160	-50	-110	-620	220	400
Трехфазное КЗ	400	-200	-200	-1500	750	750

сети с исследуемым трансформатором при наличии активной нагрузки в его вторичной цепи показана на рис. 3. Здесь в

отличие от схемы на рис. 1 во вторичной обмотке трансформатора содержится блок измерения токов и напряжений, блок моделирования однофазного и трехфазного КЗ на землю и трехфазная активная нагрузка, имеющая номинальное значение.

На рис. 4, а приведены компьютерные осциллограммы трех фазных токов в первичных (вверху) и вторичных обмотках трансформатора (внизу) в режиме однофазного КЗ. Как видно из этого рисунка, в критический момент t_2 токи достигают максимального значения, превышающего номиналь-

В качестве модели силового трансформатора используется стандартная Simulink-модель. Вторичная обмотка трансформатора на рис. 1 разомкнута (исследуется случай включения СТ на холостом ходу) и на ее фазу *a* подается затухающий во времени ток от дополнительного управляемого источника тока, что позволяет моделировать различное значение остаточной индукции намагничивания в стержнях трансформатора, зависящее от величины этого тока.

Режим включения трансформатора на холостом ходу. Компьютерные осциллограммы трех фазных первичных токов трансформатора и магнитные индукции в его стержнях при включении трансформатора на холостом ходу показаны на рис. 2, а. Данные приведены для случая остаточной магнитной индукции в стержне фазы *a* трансформатора $B_r = 0,9$ Тл. Как видно из этих осциллограмм, в момент времени t_1 возникает бросок тока в фазе *a*, достигающий максимального значения 275 А. При номинальном значении тока трансформатора 54 А кратность тока включения трансформатора составляет $275/54=5,1$, что хорошо согласуется с данными, приведенными в работе [4]. Полученные из осциллограмм для момента времени t_1 значения трех фазных токов в первичной обмотке трансформатора приведены в таблице (строка 1) и будут использоваться на этапе 2 при расчете магнитного поля и сил.

Следует отметить, что при выбранной схеме заземления источника питания и обмоток трансформатора в момент броска тока сумма значений токов в трех фазах не равна нулю. Разностный ток, равный алгебраической сумме этих токов, протекает в переходный момент

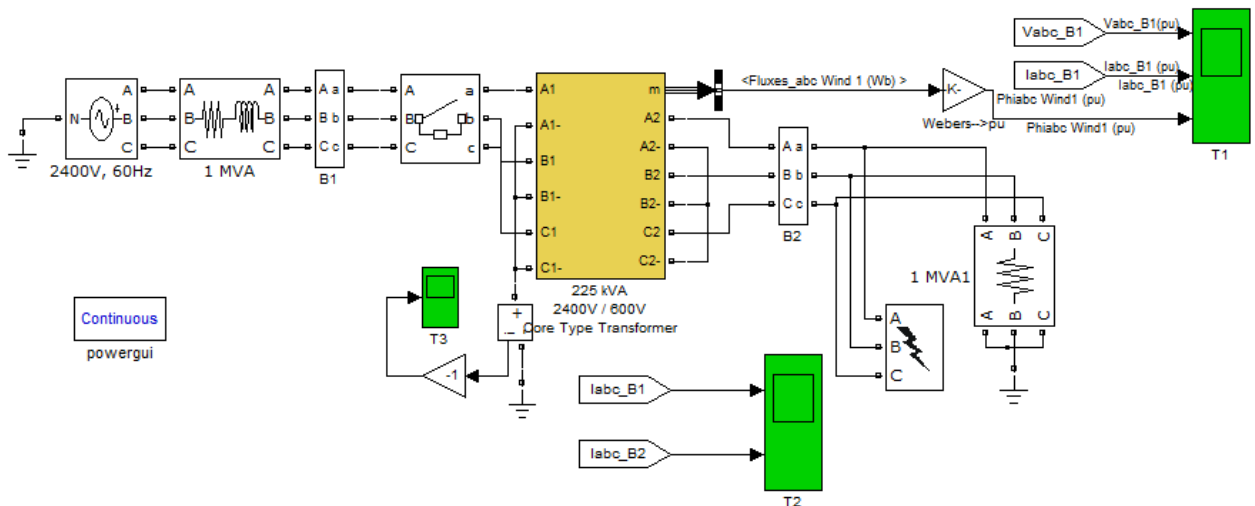


Рис. 3

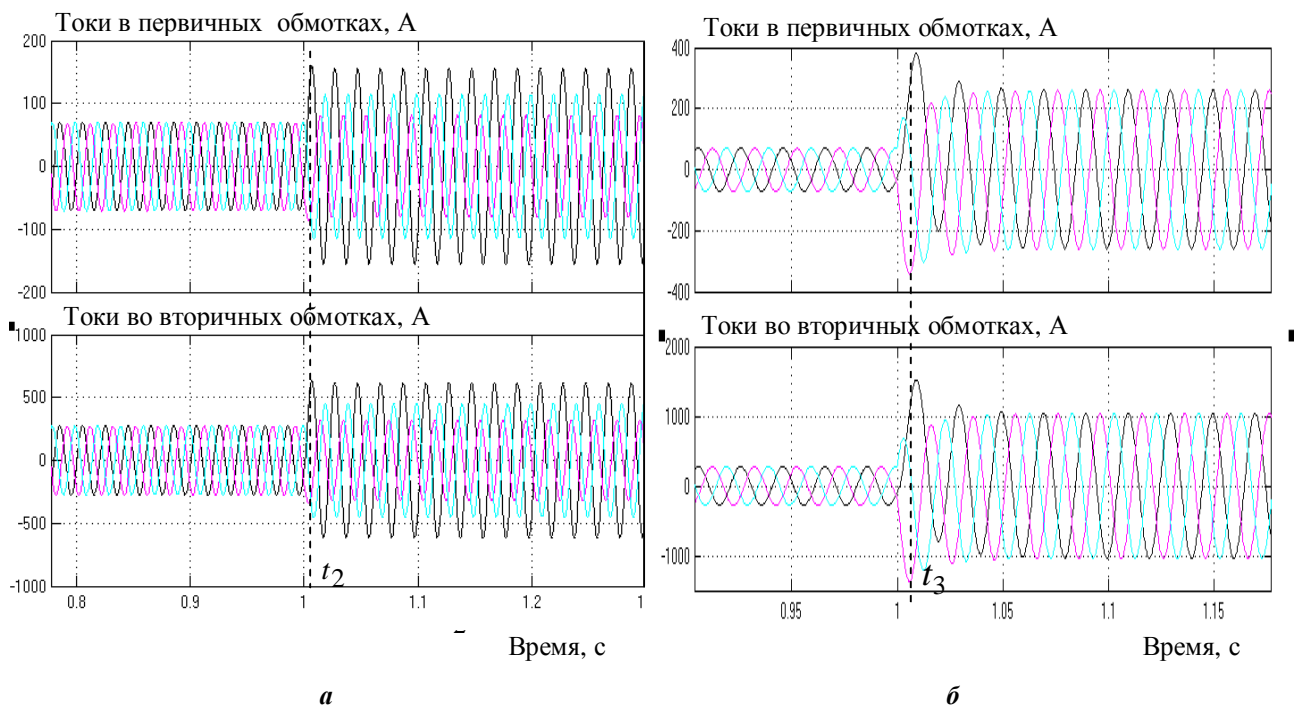


Рис. 4

ное приблизительно в 2 раза. Полученные из этих осциллограмм значения шести токов в момент t_2 приведены в таблице (строка 2) и будут использоваться далее при расчете магнитного поля и сил в режиме однофазного КЗ.

На рис. 4, б показаны компьютерные осциллограммы трех фазных токов в первичных (вверху) и вторичных обмотках трансформатора (внизу) в режиме трехфазного КЗ. Как видно из этого рисунка, в критический момент t_3 токи достигают максимального значения, превышающее номинальное приблизительно в 4 раза. Значения шести токов в момент t_3 также приведены в таблице (строка 3) и будут использоваться далее при расчете магнитного поля и сил в режиме трехфазного КЗ.

Численный расчет магнитного поля и электродинамических сил в обмотках трансформатора в аварийных режимах. Общий вид исследуемого трехфазного силового трансформатора 225 кВА, 2400/600 В со стержневым магнитопроводом, реализованный средствами пакета Comsol, показан на рис. 5, а (в силу существующей симметрии рассматривается только верхняя половина трансформатора). На рис. 5, б показано разбиение на конечные элементы активных частей трансформато-

ра, содержащее 32428 конечных элементов (разбиение на конечные элементы воздушного пространства здесь не показано).

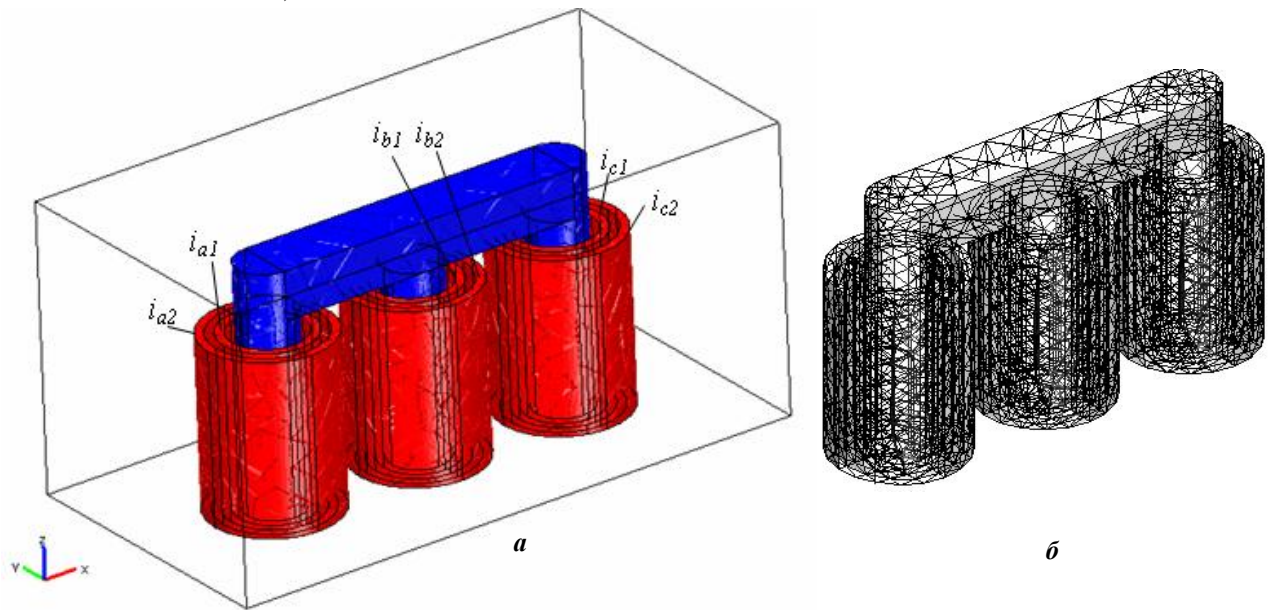


Рис. 5

Магнитное поле в активной зоне СТ рассчитывается в магнитоэстатическом приближении в предположении, что токи во всех обмотках трансформатора (мгновенные значения) известны – их значения были получены на этапе № 1 и приведены для различных режимов в таблице.

Система дифференциальных уравнений для векторного магнитного потенциала \mathbf{A} в активной зоне трансформатора имеет следующий вид:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r(|\mathbf{B}|)^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}^e, \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = 0. \quad (1)$$

Здесь $\mu_r(|\mathbf{B}|)$ – относительное значение магнитной проницаемости стали, зависящее от модуля век-

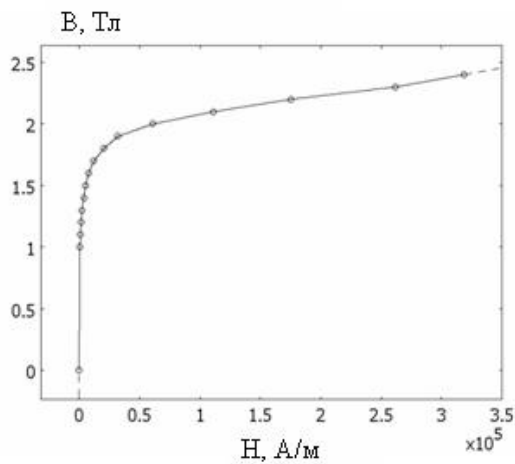


Рис. 6

тора магнитной индукции $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, \mathbf{J}^e – вектор мгновенного значения плотности токов в обмотках трансформатора – задается по данным таблицы. Для учета нелинейных магнитных свойств электротехнической стали использовалась кривая намагничивания, показанная на рис. 6. Эта зависимость в виде табличных данных вводилась в программу Comsol по установленному правилу.

В качестве граничных условий принималось: на нижней границе – тангенциальная компонента магнитного поля $\mathbf{B} \times \mathbf{n} = 0$, на верхней и боковых границах – условие магнитной изоляции – $\mathbf{A} = 0$. После расчета распределения магнитного поля выполнялся расчет мгновенного значения электродинамических сил в обмотках трансформатора, характеризующихся объемной плотностью

$$\mathbf{f} = \mathbf{J}^e \times \mathbf{B}.$$

Результаты расчета магнитного поля \mathbf{B} в магнитопроводе и электродинамических сил \mathbf{f} в обмотке трансформатора в режиме холостого хода показаны на рис. 7. При расчетах использовались мгновенные значения токов в первичных обмотках трансформатора, приведенные в строке 1 таблицы. Здесь показано распределение магнитной индукции (в оттенках серого и стрелками) в магнитопроводе (рис. 7, а) и объемной плотности электродинамических сил в обмотке (рис. 7, б). Видно, что большое значение тока в фазе а приводит к насыщению стержня этой фазы – максимальная индукция достигает значения 1,95 Тл. Из распределения объемной плотности электродинамических сил следует, что силы имеют преимущественно радиальную составляющую, направленную наружу. В концевых зонах обмотки (сверху и снизу) существует значительная осевая составляющая силы, обжимаю-

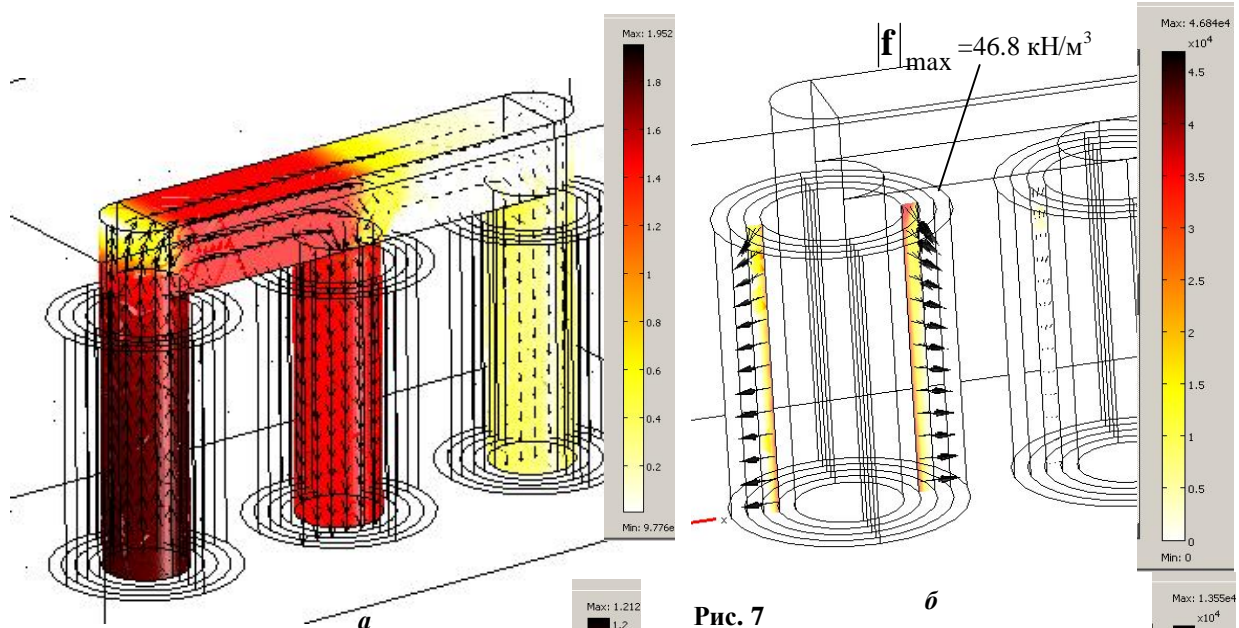


Рис. 7

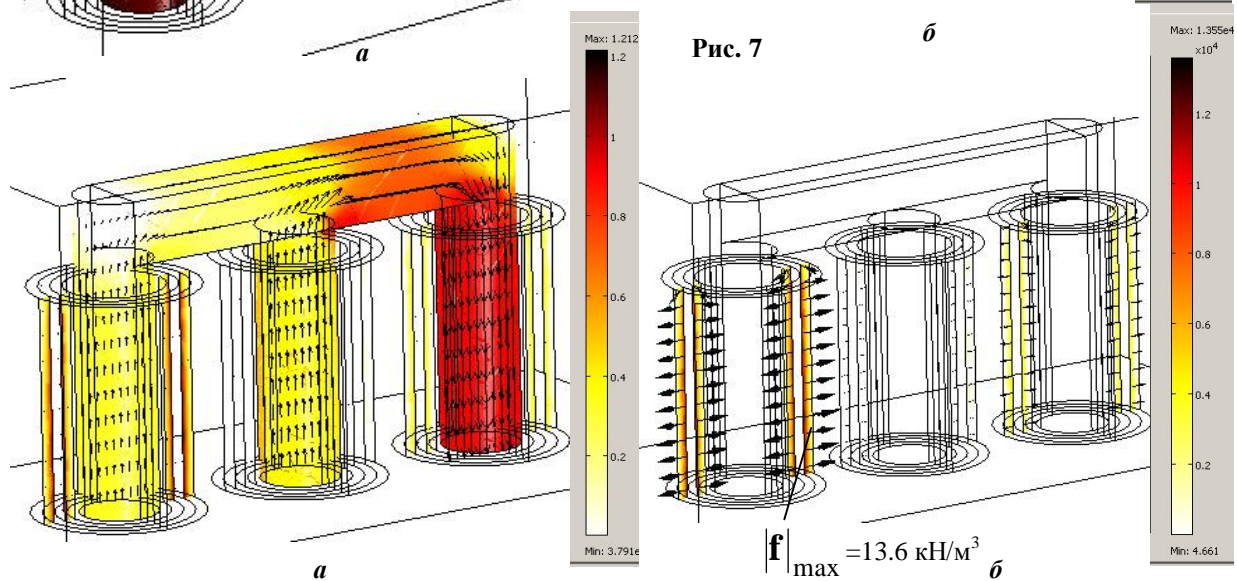


Рис. 8

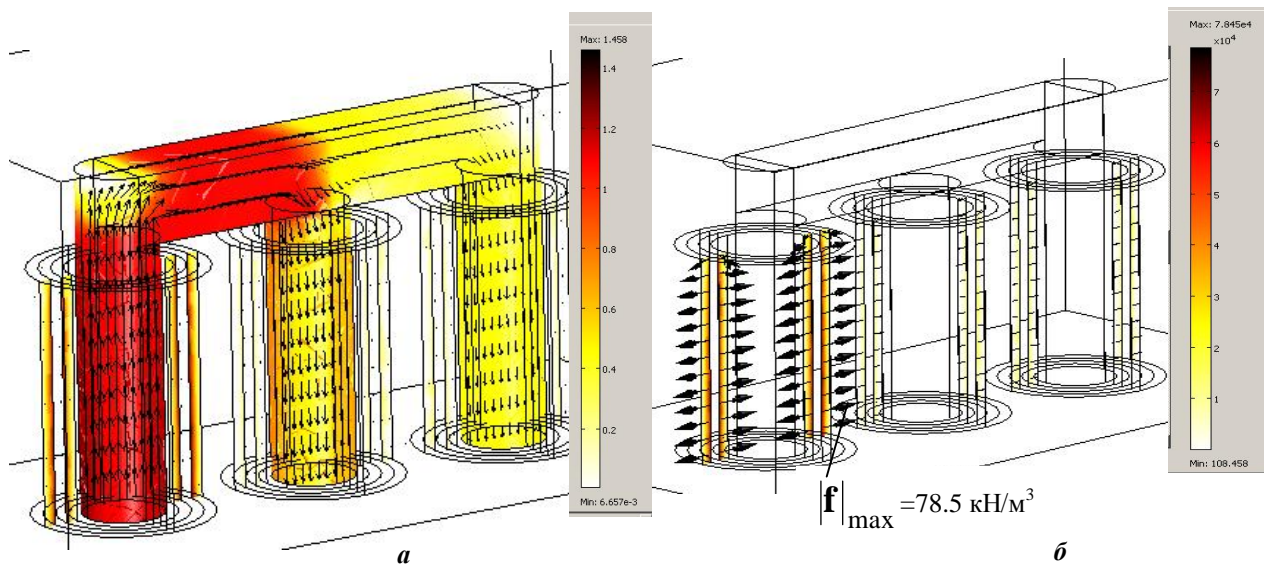


Рис. 9

щая обмотку. Максимальная величина модуля вектора силы $|\mathbf{f}|_{\max}$ имеет место именно в концевой зоне и составляет $46,8 \text{ кН/м}^3$. Отметим, что распределение сил в обмотке трансформатора в этом режиме имеет такой же характер, как и распределение сил в уединенном соленоиде без магнитного сердечника (см., например, работу [5]).

Результаты расчета магнитного поля \mathbf{B} в магнитопроводе и электродинамических сил \mathbf{f} в обмотке трансформатора в режиме однофазного КЗ приведены на рис. 8, *a* и *б*, соответственно. Здесь использовались мгновенные значения токов в первичных и вторичных обмотках трансформатора, приведенные в строке 2 таблицы. Видно, что в критический момент времени t_2 наибольшее суммарное значение ампер-витков имеет место в стержне фазы *c*, отсюда и наибольшее значение магнитного поля, равное $1,21 \text{ Тл}$, достигается в этом стержне. Из распределения объемной плотности электродинамических сил на рис. 8, *б* следует, что силы имеют преимущественно радиальную составляющую, расталкивающую первичную и вторичную обмотки фазы *a*, причем максимальная величина силы $|\mathbf{f}|_{\max}$ имеет место в центральной области и составляет $13,6 \text{ кН/м}^3$, т.е. приблизительно в 3 раза меньше, чем в режиме холостого хода.

Результаты расчета магнитного поля \mathbf{B} в магнитопроводе и электродинамических сил \mathbf{f} в обмотке трансформатора в режиме трехфазного КЗ показаны на рис. 9, *a* и *б*, соответственно. Здесь использовались мгновенные значения токов в первичных и вторичных обмотках трансформатора, приведенные в строке 3 таблицы. Видно, что в критический момент времени t_3 наибольшее полное значение ампер-витков имеет место в фазе *a*, отсюда и наибольшее поле, равное $1,46 \text{ Тл}$, достигается в стержне этой фазы. Из распределения объемной плотности электродинамических сил на рис. 9, *б* видно, что силы имеют преимущественно радиальную составляющую, расталкивающую первичную и вторичную обмотки фазы *a*, причем максимальная величина силы $|\mathbf{f}|_{\max}$ имеет место в центральной области и составляет $78,5 \text{ кН/м}^3$, т.е. приблизительно в 2 раза больше, чем в режиме холостого хода. Таким образом, исследование трех аварийных режимов работы трансформатора показало, что максимальное значение электродинамических сил в его обмотке реализуется в режиме трехфазного КЗ, а минимальное – однофазного КЗ.

Заключение. В работе предложен подход к моделированию электромагнитных процессов в силовом трансформаторе в аварийных режимах, включающий расчет мгновенных значений электрических токов в обмотках трансформатора в пакете Matlab/Simulink, расчет магнитного поля в его активной зоне и распределение электродинамических сил в обмотках с использованием пакета Comsol. Особенностью работы является учет нелинейных свойств магнитопровода и наличие остаточной индукции при включении СТ на холостом ходу, а также возможность учета сложной структуры электрической сети, в которой установлен этот СТ, и влияния места возникновения КЗ на линии электропередачи на величину токов в трансформаторе.

Рассмотрены три аварийных режима работы трансформатора применительно к конкретной электрической сети – включение в произвольный момент времени трансформатора на холостом ходу с насыщенным магнитопроводом, однофазное и трехфазное КЗ в нагрузке. Показано, что максимальные электродинамические силы в обмотках реализуются в режиме трехфазного КЗ, а минимальные – однофазного.

Использование полученной количественной информации об электродинамических силах в различных аварийных режимах работы силового трансформатора позволяет повысить качество его проектирования, а учет при этом конкретной структуры и параметров электрической сети, в которой предполагается его установка, и места возникновения КЗ позволяет повысить эксплуатационную надежность этого трансформатора.

1. Бунин А.Г., Конторович Л.Н., Виногровев М.Ю. Расчет распределения токов и напряжений в обмотках трансформаторов // Электротехника. – 1977. – № 4. – С. 8–11.

2. Бунин А.Г., Конторович Л.Н. Расчет импульсных перенапряжений в обмотках трансформаторов с учетом влияния магнитопровода // Электричество. – 1975. – № 7. – С. 50–54.

3. Басова А.В., Иванков В.Ф., Кокошин С.С., Хімюк І.В. Числове моделювання магнітного поля, втрат у провідних деталях на стрижнях трансформаторів та реакторів // Техн. електродинаміка. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч. 2. – С. 25–30.

4. Лазарев Н.С., Шульга Р.Н., Шульга А.Р. Токи включения силового трансформатора // Электротехника. – 2010. – № 11. – С.11 – 17.
5. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М: Мир. – 1972. – 392 с.
6. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. – С.-Пб.: Питер, 2008. – 287 с.
7. Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов / Под ред. А.И.Лурье. – М.: Знак, 2006. – 520 с.
8. www.comsol.com

УДК 621.314.2

Чисельний розрахунок електричних струмів, магнітного поля та електродинамічних сил у силовому трансформаторі в аварійних режимах з використанням MATLAB/SIMULINK I COMSOL

О.Д.Подольцев¹, докт.техн.наук, **Л.Н.Конторович²**, канд.техн.наук,

¹ – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

² – ВАТ «Запоріжтрансформатор», Дніпропетровське шосе, 3, Запоріжжя, 69600, Україна.

Запропоновано підхід до моделювання електромагнітних процесів у силовому трансформаторі в аварійних режимах, що включає розрахунок миттєвих значень електричних струмів в обмотках трансформатора в пакеті Matlab/Simulink, розрахунок магнітного поля в активній зоні трансформатора та розподілу електродинамічних сил в його обмотках за допомогою програми Comsol. Розглянуто три аварійних режими роботи трансформатора для конкретної електричної мережі – включення трансформатора з насиченим магнітопроводом на холостому ході, однофазне та трифазне КЗ у навантаженні. Показано, що максимальні силові навантаження в обмотках реалізуються в режимі трифазного КЗ, а мінімальні – однофазного КЗ. Бібл. 8, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: силовий трансформатор, струми включення, струми короткого замикання, магнітне поле, Matlab/Simulink, Comsol.

Numerical Simulation of Electric Currents, Magnetic Field and Electrodynamical Forces in Power Transformer at Emergency Operation Using MATLAB/SIMULINK AND COMSOL

A.D.Podoltsev, L.N.Kontorovich,

¹ – The Institute of Electrodynamics, Ukrainian National Academy of Sciences, pr. Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

² – Public Corporation «Zaporozhtransformator», Dnepropetrovskoe shosse, 3, Zaporozhe, 69600, Ukraine.

The approach to modeling of electromagnetic processes in power transformer at emergency operation is proposed. It consists of computation of instantaneous currents in transformer windings using Matlab/Simulink, computation of magnetic field in active zone of transformer and determination of distribution of electromagnetic forces in windings by means of code Comsol. Three types of emergency operation of the transformer as applied to specific power system (namely, connection of transformer with saturated core at no-load, single-phase and three-phase short-circuit in a load) are considered. As shown, maximum value of forces in the windings are realized under condition of three-phase short-circuit, and minimum - at single-phase short-circuit. References 8, table 1, figures 9.

Key words: power transformer, inrush current, short-circuit current, magnetic field, Matlab/Simulink, Comsol.

1. Bunin A.G., Kontorovich L.N., Vinogreev M.Yu. Calculation of current and voltage in transformer winding // Elektrotehnika. – 1977. – № 4. – P. 8–11. (Rus)

2. Bunin A.G., Kontorovich L.N. Calculation of pulsed overvoltage in transformer winding taking inter account of magnetic core // Elektrichestvo. – 1975. – № 7. – P. 50–54. (Rus)

3. Basova A.V., Ivankov V.F., Kokoshin S.S., Khimiuk I.V. Numerical simulation of magnetic field and losses in the conductive parts of transformer and reactor core // Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniki". – 2010. – Vol 2. – P. 25–30. (Ukr)

4. Lazarev N.S., Shulga R.N., Shulga A.R. Current of swishing of power transformer // Elektrotehnika. – 2010. – № 11. – P. 11–17. (Rus)

5. Knoopfel G. High magnetic field. – Moskva: Mir, 1972. – 392 p. (Rus)

6. Chernykh I.V. Modeling of electrical equipment with help of Matlab, SimPowerSystems and Simulink. – Sankt-Petersburg, Piter, 2008. – 287 p. (Rus)

7. Electrodynamical endurance of transformers and reactors // Ed. by A.I.Lurie. – Moskva: Znak, 2006. – 520 p. (Rus)

8. www.comsol.com

Надійшла 25.05.2011

Received 25.05.2011