

Гнидюк А. Ф.
A. F. Gnidyuk

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

SIMULATING THE THERMAL OPERATING CONDITIONS OF POWER TRANSFORMERS



Гнидюк А. Ф. – старший руководитель проектов, ООО «АББ» (Россия, Москва); 117997, г. Москва, ул. Обручева, дом 30/1; 8-985-253-98-92. E-mail: alexeygnidyuk@mail.ru.

Mr. Alexey F. Gnidyuk – senior project manager, ООО “ABB” (Russia, Moscow); 30/1 – 2, Obrutcheva Str.; Moscow, 117997; 7 (985) 2539892. E-mail: alexeygnidyuk@mail.ru.

Аннотация. В статье рассматриваются принципы моделирования тепловых режимов работы силового трансформатора. Принцип построения модели силового масляного трансформатора представлен как математическая модель сложной нелинейной термогидравлической системы. С помощью программного пакета Comsol Multiphysics созданы варианты моделей трансформатора как с дефектами, так и без таковых. Трансформатор представлен в виде прямоугольного бака, заполненного трансформаторным маслом и с располагающимися внутри него обмотками и сердечником. Дополнительно вокруг бака создана область, заполненная воздухом. Задание дефектов производилось посредством введения дополнительных источников теплоты в созданную модель. В основу расчетов данного программного пакета лег получивший широкое распространение для расчетов и решения дифференциальных уравнений с частными производными метод конечных элементов.

Моделирование тепловых процессов, протекающих в трансформаторном оборудовании, позволяет установить с высокой долей вероятности наличие и идентификацию неисправностей на начальной стадии развития дефекта, что может позволить уйти от проведения плановых ремонтов, устанавливаемых на основании срока эксплуатации трансформатора, и получить экономию от снижения издержек на эксплуатацию, снизить до минимума переменные расходы от убытков, вызванных потенциальным выходом из строя трансформаторного оборудования.

Summary. The paper reviews the principles of simulation of the operating thermal conditions of a power transformer. The principle of the oil filled power transformer modelling is presented as a mathematical simulation of a complex nonlinear thermal hydraulic system. For the modeling of transformers with or without defects I use the Comsol Multiphysics software package. The transformer is presented as rectangular tank filled with transformer oil having the core and the windings inside. Additionally I designed an area around the tank that is filled with air. Defects are introduced in the model as additional sources of heat. The calculation basis of this software package is the widely adopted finite elements method. The heat process simulation in a transformer allows us to detect and identify emerging defects at early stages. Thus, the method could help reduce the amount of routine maintenance and repair needed for a transformer in accordance with its operational lifetime, and cut operational costs. Also this can minimize the variable costs linked to a potential transformer breakdown.

Ключевые слова: силовой трансформатор, нагрев, срок эксплуатации, идентификация, математическая модель.

Key words: power transformer, heating, operating lifetime, identification, mathematical model.

УДК 621.31: 621.25

Введение

При работе трансформаторов возникают потери электрической энергии, превращающиеся в конечном счете в теплоту. Теплота повышает температуру обмоток трансформаторов, активной стали, контактных соединений, конструктивных деталей и одновременно рас-



сеивается в окружающую среду [1], [2]. Нагревание оборудования ограничивает его мощность и является главной причиной старения изоляции. Моделирование же тепловых процессов и распределения тепловых полей, происходящих в трансформаторе на стадии проектирования, позволяет оптимально разнести конструктивные элементы таким образом, чтобы при эксплуатации распределение температуры по объему трансформатора стремилось к высокой степени однородности. Проведенный анализ научно-технической отечественной и зарубежной литературы показал, что работ, непосредственно посвященных мониторингу и моделированию тепловых полей сложных электротехнических элементов и устройств, имеется небольшое количество. Недостаточно исследованы процессы распределения тепловых потоков внутри и снаружи трансформаторов, а также их моделирование и контроль. Почти не рассмотрены вопросы определения и идентификации внутренних повреждений и их степени как для трансформаторного, так и для иного электротехнического оборудования, выполненного на основании мониторинга тепловых полей, и внесения корректировок в тепловую модель трансформаторного оборудования. Некоторые проведенные ранее исследования создали предпосылки для решения задач по идентификации внутренних нарушений и повреждений трансформаторного оборудования, влияющих на тепловой режим работы оборудования, а также определения температуры дефекта и его месторасположения. Поэтому теоретическое обобщение процессов теплового распределения с учетом динамического движения трансформаторного масла в трансформаторном оборудовании и идентификация на этой основе его повреждений и мониторинг работоспособности является актуальной научной задачей.

Принципы моделирования тепловых режимов работы трансформатора

В настоящее время разработано и аппаратно реализовано множество систем защиты, а также определенное число эффективных систем диагностики и мониторинга состояния высоковольтных силовых трансформаторов. Экономический эффект от использования систем диагностики и мониторинга обусловлен предупреждением аварийного выхода из строя оборудования и переходом от проведения планово-предупредительных ремонтов к проведению ремонтов по состоянию. Так, при номинальной частоте 50 Гц основную часть паспортных потерь составляют потери Джоуля – Ленца (на активном сопротивлении, близком по своему значению к сопротивлению постоянному току), а также потери на гистерезис и токи Фуко в магнитопроводе. Остальные потери являются добавочными и составляют несколько процентов от основных.

Перспективным направлением является создание системы мониторинга для предупреждения различных повреждений трансформаторного оборудования. Очевидно, что при каждом определенном дефекте будет иметь место свое уникальное распределение теплового поля, а значит и свои последствия. Идентификация потенциально возможных дефектов с помощью анализа распределения теплового поля – довольно эффективный способ избежать выхода из строя трансформаторного оборудования.

В большинстве случаев для оценки состояния оборудования создаются математические модели, содержащие в себе большое количество расчетов, требующих большого количества времени как для расчета каждого отдельного узла, так и единицы трансформаторного оборудования. К тому же, при расчете сложных систем нередко ошибки чисто математического характера.

Создание модели можно условно разбить на три стадии. Первая стадия – это сбор данных для моделирования, цель этой стадии собрать максимальное количество релевантной информации, требующейся для создания модели. Вторая стадия – непосредственно само моделирование, оптимизация алгоритмов и отдельных элементов модели. Третья стадия – это оценка модели, сравнение показателей модели с реальными экспериментами, данными об эксплуатации трансформаторного оборудования, что является необходимым для условия принятия модели или решения о ее доработке.

На рис. 1 приведена типовая блок-схема процесса создания модели с указанием движения информации согласно стадиям моделирования, указанным выше.



Рис. 1. Блок-схема процесса создания модели

Более перспективным и наглядным является создание интерактивных моделей в различных программных пакетах [3]. Они позволяют создавать модели, близкие к реальным, при этом не требуя глубоких математических знаний.

В данной работе для моделирования был использован программный пакет Comsol Multiphysics [4]. Comsol Multiphysics – это мощная интерактивная среда, служащая для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных и интегральных уравнениях методом конечных элементов. С этим программным пакетом можно расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим), в мультифизические модели для расчета связанных между собой физических явлений. Таким образом, в основе расчетов программного пакета Comsol Multiphysics лежит использование метода конечных элементов [5].

Полную трёхмерную компьютерную модель такой сложной нелинейной термогидравлической системы, как реальный масляный силовой трехфазный трансформатор, можно определить как общую теплогидравлическую макромоделю трансформатора [3]. Она может включать в себя описание как геометрии, так и детальной структуры всех трёх фаз, включающих в себя магнитопровод и рабочие обмотки трансформатора. Задача такой модели состоит в обеспечении получения достоверных основных интегральных характеристик системы тепловыделения, распределения температуры на выделенных поверхностях, а также определения температуры отдельных точек.

Для упрощения процесса моделирования на уровне макромоделю обмотка была представлена эквивалентным сплошным твёрдым телом без отдельного рассмотрения конвекции в межкатушечных горизонтальных каналах и детальной структуры катушек с изоляцией и дистанцирующими прокладками. Задачей макромоделю является описание и общий расчёт теплогидравлических процессов всего трансформатора с обязательным учётом всех (как основных, так и дополнительных) тепловыделений, имеющих место в трансформаторе.

С помощью Comsol Multiphysics были созданы варианты моделей трансформатора как с наличием дефектов, так и без таковых. Упрощенная модель трансформатора представлена в виде прямоугольного бака, заполненного трансформаторным маслом и с располагающимися внутри него обмотками и сердечником. Дополнительно вокруг бака была создана область, заполненная воздухом. Дефекты были заданы как дополнительные источники теплоты.

Проведенные расчеты распределения теплового поля наглядно показали распределение теплового поля по всей поверхности модели, включая температуры на ребрах и границах. Проведены расчеты для моделей с дефектами в одной из обмоток, в сердечнике, одновременно в разных частях трансформатора. В области, где был расположен дефект, температура выше, чем в аналогичной области модели с заданием нормального режима работы (наличие дефектов отсутствует), следовательно, температура на поверхности трансформатора также повышается.

На рис. 2 представлен пример полученной модели силового трехфазного трансформатора без наличия дефектов.

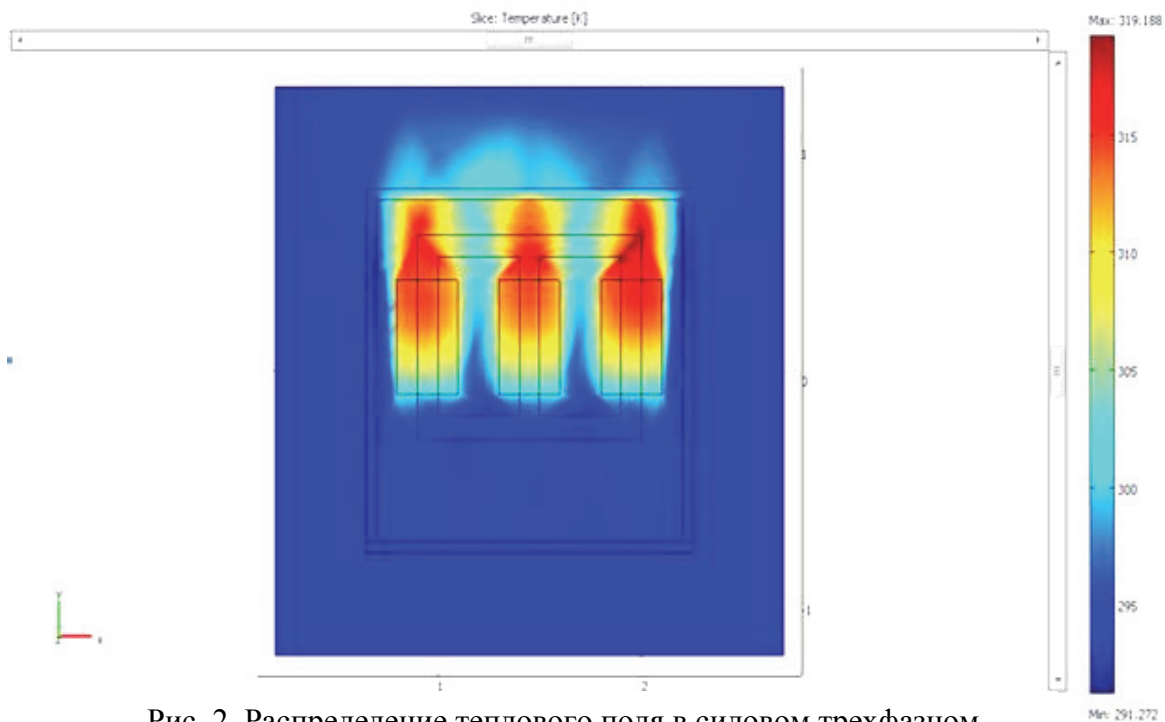


Рис. 2. Распределение теплового поля в силовом трехфазном трансформаторе без дефектов

Таким образом, Comsol Multiphysics позволяет смоделировать и наглядно продемонстрировать распределение температурных полей при заданном режиме работы трансформатора. Создание интерактивной модели может стать очень удобным и перспективным способом диагностики и мониторинга дефектов в различных его частях. Это позволяет прогнозировать и предупреждать развитие различных дефектов и, следовательно, продлевать срок службы оборудования (рис. 3).

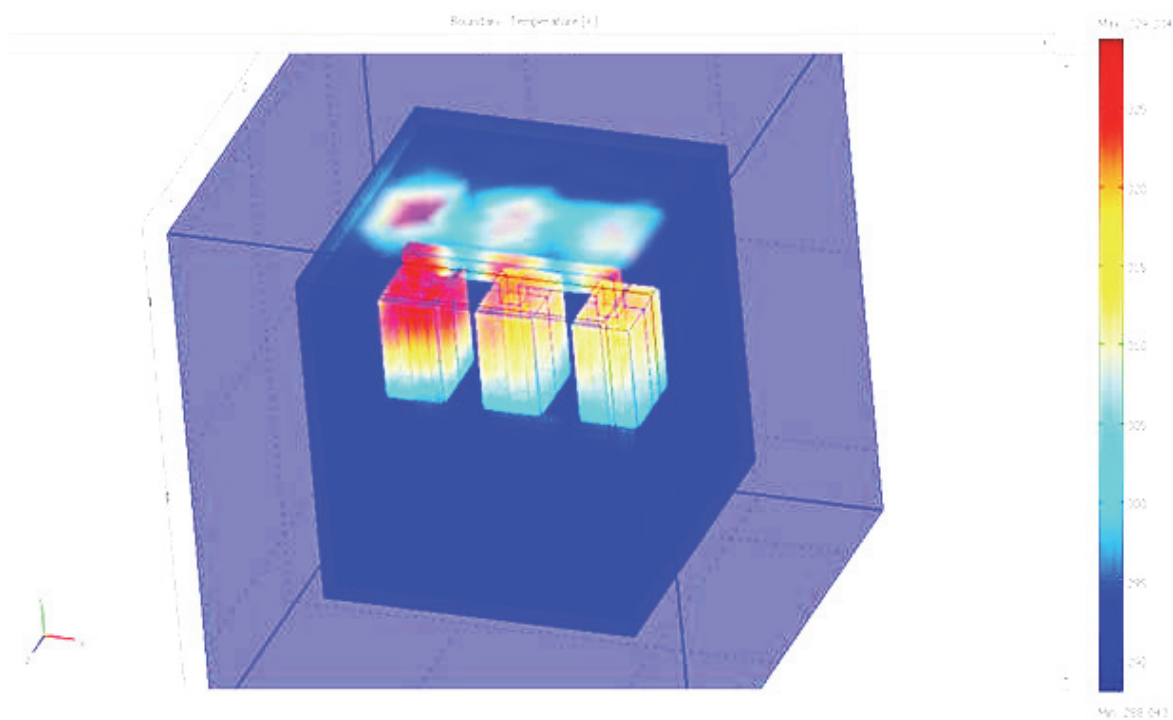


Рис. 3. Распределение теплового поля в силовом трехфазном трансформаторе с дефектом фазы А (левая обмотка)



Выводы

Моделирование тепловых процессов трансформаторного оборудования позволяет предотвратить значительное число неисправностей, связанных с неравномерным распределением тепла в трансформаторе, а также устанавливать с высокой долей вероятности потенциальные неисправности во время эксплуатации трансформаторов, т.е. на начальной стадии развития дефекта. Таким образом, моделирование и мониторинг тепловых процессов позволяет в значительной степени снизить внеплановые ремонты, связанные с перегревом трансформаторов. В свою очередь, результатом будет снижение издержек на эксплуатацию и уменьшение потенциальных убытков от выхода оборудования из строя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roger W. Pryor Multiphysics modeling using Comsol: a first principles approach. Jones and Bartlett Publishers London W6 7PA United Kingdom, 2011. – 871 с.
2. Приходченко, О. В. Исследование процессов массо- и теплообмена в совмещенных энергетических устройствах методами визуального анализа / О. В. Приходченко, А. А. Просолович, К. К. Ким // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № I-1(17). – С. 15-21.
3. Дульнев, Г. Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена: учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов // Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М.: Высш. шк., 1990. – 207 с.
4. Исаченко, В. П. Теплопередача: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
5. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд.– М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. Ministry of Energy of the Russian Federation. Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/en/>
7. ABB Review The corporate technical journal (November, 2012). Special report transformers, November, 2012. Режим доступа: [http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/c3791bac5b25bd10c1257ab80037553b/\\$file/ABB%20SR%20Transformers-121031.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/c3791bac5b25bd10c1257ab80037553b/$file/ABB%20SR%20Transformers-121031.pdf).
8. U.S. Energy Information Administration (2014). Режим доступа: <http://www.eia.gov/>.
9. The international monthly magazine Modern Power Systems (2014). Режим доступа: <http://www.modernpowersystems.com/>.
10. Global research and consulting for the energy industry (2014). Режим доступа: <http://energy.globaldata.com/>.