

УДК 621.314.222.6.082.63

А. Ф. ГНИДЮК (ДВГУПС)

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 680021, Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева 47, тел. +7 (4212) 40-74-89

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Введение

При работе трансформаторов возникают потери энергии, превращающиеся в конечном счете в теплоту. Теплота повышает температуру обмоток, активной стали, контактных соединений, конструктивных деталей и одновременно рассеивается в окружающую среду [1]. Нагревание оборудования ограничивает его мощность и является главной причиной старения изоляции. Проведенный анализ научно-технической отечественной и зарубежной литературы показал, что работ, непосредственно посвященных мониторингу тепловых полей сложных электротехнических элементов и устройств имеется небольшое количество. Не исследованы процессы распределения тепловых потоков внутри и снаружи устройства, не рассмотрены вопросы определения и идентификации внутренних повреждений трансформаторного и иного электротехнического оборудования. Проведенные ранее исследования создали предпосылки для решения задач идентификации внутренних нарушений, влияющих на тепловой режим работы оборудования, и определения его месторасположения и температуры дефекта. Поэтому теоретическое обобщение процессов теплового распределения с учетом динамического движения масла в трансформаторах и идентификация на этой основе его повреждений (состояния работоспособности) является актуальной научной задачей.

Принципы моделирования тепловых режимов работы трансформатора

В настоящее время разработано и аппаратно реализовано множество систем защиты, диагностики и мониторинга состояния высоковольтных силовых трансформаторов. Экономический эффект от их использования обусловлен предупреждением аварийного выхода из строя оборудования и переходом от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по состоянию. 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 поте-

ри на гистерезис и токи Фуко в магнитопроводе. Остальные потери являются добавочными и составляют несколько процентов от основных.

Перспективным является создание систем мониторинга для предупреждения различных повреждений трансформаторного оборудования. Очевидно, что при каждом определенном дефекте будет свое распределение теплового поля, а значит и свои последствия. Идентификация потенциально возможных дефектов с помощью анализа распределение 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, требующие большое количество времени для расчета каждого отдельного узла единицы оборудования. К тому же, при расчете сложных систем нередко ошибки чисто математического характера.

Создание модели можно условно разбить на 3 стадии. Первая это сбор данных для моделирования, цель этой стадии собрать максимальное количество 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 оборудования, что является необходимым для условия принятия модели или о ее доработке.

На рис. 1 приведена блок-схема процесса создания модели.



Рис. 1. Блок-схема процесса создания модели

Более перспективным и наглядным является создание интерактивных моделей в различных программных пакетах [2]. Они позволяют создавать модели, близкие к реальным, при этом не требуя глубоких математических знаний.

© Гнидюк А. Ф., 2013

В данной работе для моделирования используется программный пакет Comsol Multiphysics [3]. Это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных 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. В основе расчетов пакета Comsol Multiphysics лежит метода конечных элементов [4].

Полную трёхмерную компьютерную модель такой сложной нелинейной термогидравлической системы, как реальный силовой масляный трансформатор, можно определить как общую термогидравлическую макромодель трансформатора [2]. Она может включать в себя описание геометрии и детальной структуры всех трёх фаз, включающих в себя магнитопровод и рабочие обмотки. Такая модель должна обеспечить получение достоверных основных интегральных характеристик системы тепловыделения, температуры на выделенных поверхностях.

Для упрощения моделирования, на уровне макромодели обмотка представлена эквивалентным сплошным твёрдым телом без отдельного рассмотрения конвекции в межкатушеч-

ных горизонтальных каналах и детальной структуры катушек с изоляцией и дистанцирующими прокладками. Задачей макромодели является описание и общий расчёт термогидравлических процессов всего трансформатора с обязательным учётом всех (основных и дополнительных) тепловыделений, имеющих место в трансформаторе.

С помощью Comsol Multiphysics созданы варианты моделей трансформатора с дефектами 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. Дефекты 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 расположен дефект, температура выше, чем в аналогичной модели нормального режима (без дефектов), следовательно, температура на поверхности так же повышается.

На рис. 2 и 3 представлены примеры полученных моделей с наличием дефекта и без такового.

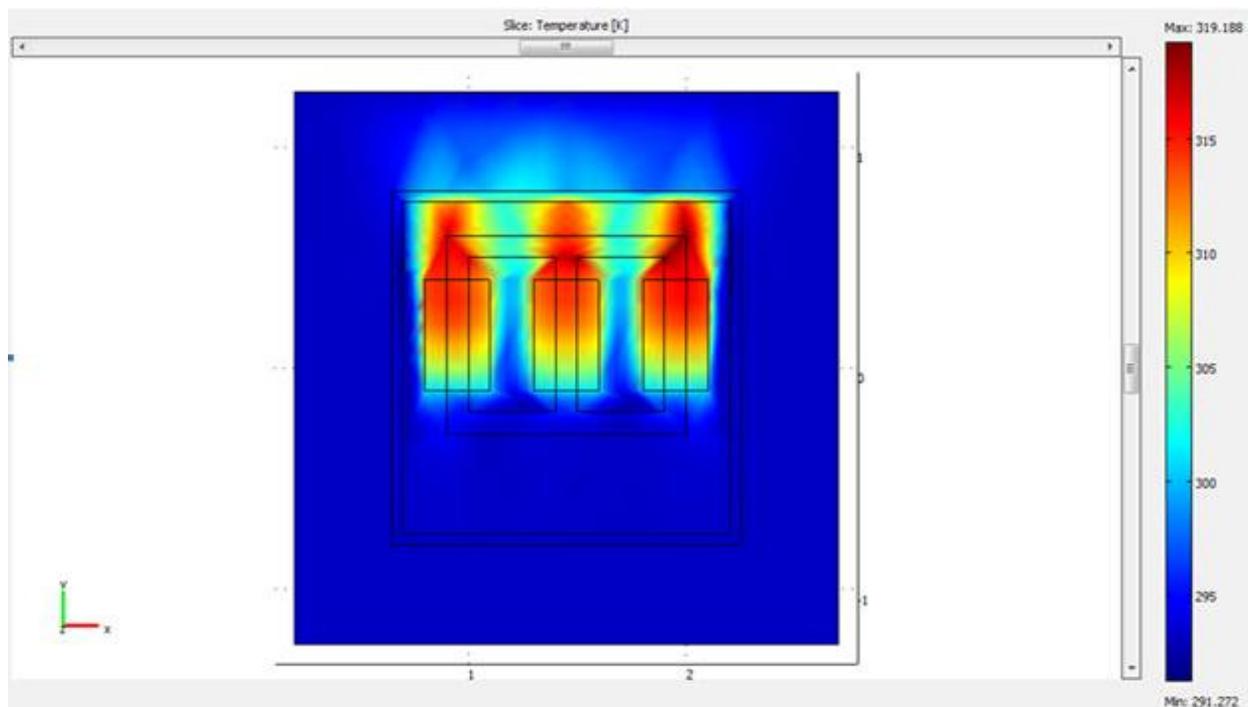


Рис. 2. Распределение теплового поля в трансформаторе без дефектов.

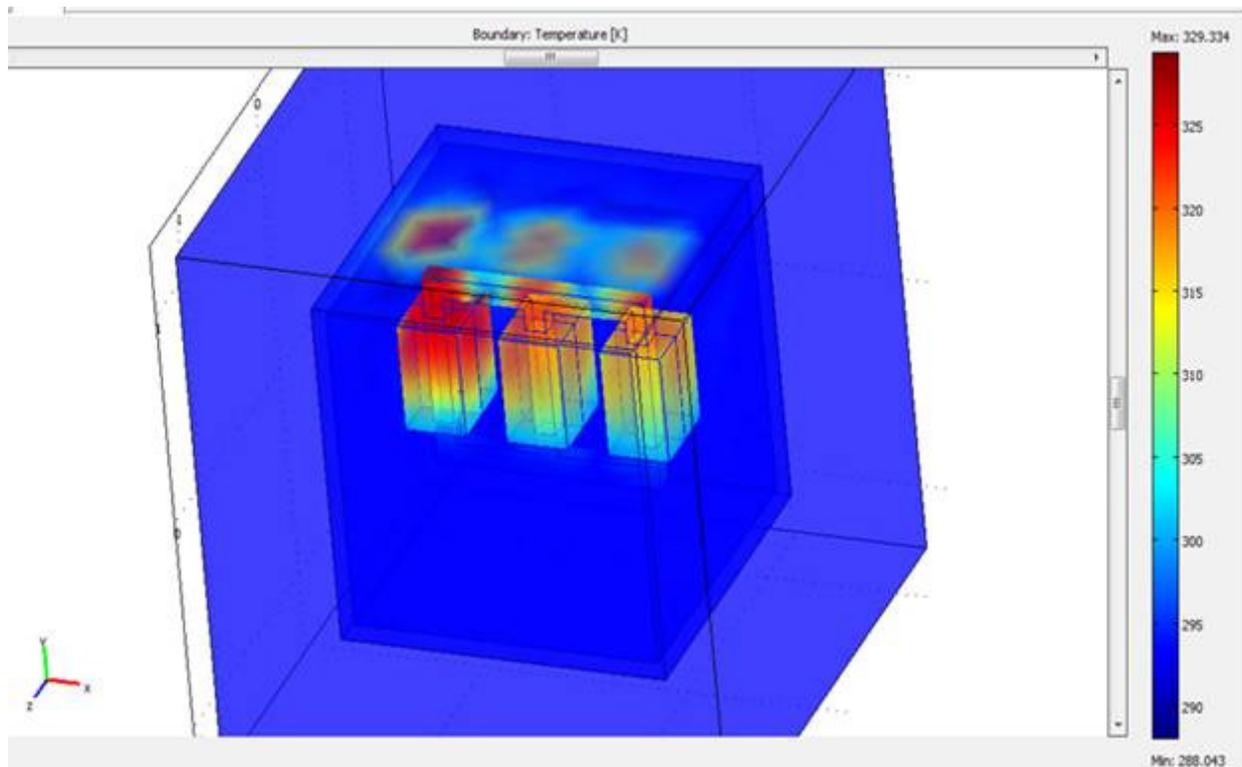


Рис. 3. Распределение теплового поля в трансформаторе с дефектом фазы А (левая обмотка).

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исаченко, В.П. Теплопередача : учеб. для вузов / В.П. Исаченко [Текст]. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Дульнев А.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена : учеб. пособие для теплофизич. и теплоэнергетич. спец. вузов / А.Н. Дульнев [Текст]. – М. : Высш. шк., 1990. – 207 с
3. Roger W. Pryor Multiphysics modeling using Comsol: a first principles approach. Jones and Bartlett Publishers London W6 7PA United Kingdom, 2011. – 871 p.
4. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд [Текст]. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

Поступила в печать 15.10.2013.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Рассматриваются принципы моделирования тепловых режимов работы силового трансформатора. Принцип построения модели силового масляного трансформатора представлен как математическая модель сложной нелинейной термогидравлической системы. Модель включает в себя описание геометрии и детальной структуры всех трёх фаз, включающих в себя магнитопровод и рабочие обмотки и обеспечивает получение достоверных основных интегральных характеристик системы тепловыделения, температуры на выделенных поверхностях.

Выводы

Моделирование тепловых процессов трансформаторного оборудования позволяет устанавливать с высокой долей вероятности наличие неисправностей на начальной стадии развития дефекта, что позволяет уйти от плановых ремонтов, получить экономию от снижения издержек на эксплуатацию и снизить к минимуму убытки от выхода оборудования из строя.

REFERENCES

1. Isachenko, V.P. Teploperedacha [The heat transfer]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1981. 416 p.
2. Dul'nev A.N. Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploobmena [The use of computers for solving problems of heat transfer]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 207 p.
3. Roger W. Pryor Multiphysics modeling using Comsol: a first principles approach. Jones and Bartlett Publishers London W6 7PA United Kingdom, 2011. 871 p.
4. Segerlind, L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of finite element method]. Moscow, Mir Publ., 1979. 392 p.

Внешний рецензент *Танкевич Е. М.*

Применяя программный пакет Comsol Multiphysics созданы варианты моделей трансформатора с дефектами 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. Дефекты заданы как дополнительные источники теплоты. В основе расчетов данного пакета лежит метод конечных элементов.

Моделирование тепловых процессов трансформаторного оборудования позволяет устанавливать с высокой долей вероятности наличие неисправностей на начальной стадии развития дефекта, что позволяет уйти от плановых ремонтов, получить экономию от снижения издержек на эксплуатацию и снизить к минимуму убытки от выхода оборудования из строя.

Ключевые слова: силовой трансформатор, потери энергии, обмотка, сердечник, нагрев, срок эксплуатации, тепловой процесс, поле, повреждение, дефект, идентификация, модель, математическая, теплогидравлическая, интерактивная.

УДК 621.314.222.6.082.63

А. Ф. ГНИДЮК (ДВГУПС, РФ)

Далекоосхідний державний університет шляхів сполучення, 680021, Росія, м. Хабаровськ, вул. Сєришева, 47, тел. +7 (4212) 40-74-89

ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРА

Розглядаються принципи моделювання теплових режимів роботи силового трансформатора. Принцип побудови моделі силового масляного трансформатора представлений як математична модель складної нелінійної термогідролічної системи. Модель включає в собі опис геометрії і детальної структури усіх трьох фаз, що включає в себе магнітопровід і робочі обмотки та забезпечує отримання достовірних основних інтегральних характеристик системи тепловиділення, температури на виділених поверхнях.

Застосовуючи програмний пакет Comsol Multiphysics створені варіанти моделей трансформатора з дефектами та без них. Трансформатор представлено у вигляді прямокутного баку, заповненого трансформаторним маслом і з обмотками та осердям, що розташовуються всередині. Додатково навколо бака створена область, заповнена повітрям. Дефекти задані як додаткові джерела теплоти. В основу розрахунку даного пакету покладено метод кінцевих елементів.

Моделювання теплових процесів трансформаторного обладнання дозволяє встановлювати з високою частотою ймовірності наявності несправностей на початковій стадії розвитку дефекту, що дозволяє уникнути планових ремонтів, отримати економію від зниження витрат на експлуатацію та знизити до мінімуму збитки від виходу обладнання з ладу.

Ключові слова: силовий трансформатор, втрати енергії, обмотка, осердя, нагрів, термін експлуатації, тепловий процес, поле, пошкодження, дефект, ідентифікація, модель, математична, теплогідролічна, інтерактивна.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Танкевич С. М.*

UDC 621.314.222.6.082.63

A. F. GNIDYUK (FESTU)

Far Eastern State University of Railways, 680021, Russia, Khabarovsk, 47 Serysheva Street, tel. +7 (4212) 40-74-89

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Discusses the principles of modeling of thermal modes of the power transformer. The principle of constructing a model of power transformer oil is presented as a mathematical model of a complex nonlinear thermal-hydraulic system. The model includes a description of the detailed structure and geometry of all three phases which include a magnetic circuit and winding performance and provides reliable integral main characteristics of heat, the temperature on the selected surfaces.

Using the software package Comsol Multiphysics model variants created transformer defects and those without. A transformer presents a rectangular tank filled with insulating oil and it is positioned within the windings and the core. Additionally created around the tank area filled with air. Defects are defined as additional sources of heat. The calculations of this package is the finite element method.

Modeling of thermal processes transformer equipment allows you to set a high probability for faults at an early stage of development of a defect that allows escape from the scheduled repairs, get the savings from reduced operating costs and reduce losses to a minimum of equipment failure.

Keywords: power transformer, loss of energy, winding, core, heat, lifetime, thermal process, field, damage, defect, identification, model, mathematical, thermohydraulic, interactive.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Tankevich E. M.*

© Гнидюк А. Ф., 2013