

10. Xia Y. and Jacobi A.M. An exact solution to steady heat condition in a two-dimensional slab on a one-dimensional fin: application to frosted heat exchangers // Int. J. Heat Mass Transfer — 2004. — V. 47. — P. 3317–3326.

11. Кошляков И.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. — М.: Высшая школа, 1970. — 707 с.

Получено 01.09.2008 г.

УДК 621.314.21.014.32

**КРУКОВСКИЙ П.Г.¹, ЯЦЕВСКИЙ В.А.¹,
КОНТОРОВИЧ Л.Н.², ИВАНКОВ В.Ф.², ЮРЧЕНКО Д.Д.¹**

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²ОАО “Запорожтрансформатор”

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К CFD-МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Розглянуто і проведено порівняльний аналіз існуючих методів теплового розрахунку силових масляних трансформаторів – методів “перегрівів” і методу теплогідрравлічних ланцюгів, а також числового методу, заснованого на CFD-моделюванні. Запропоновано методичний підхід до детального аналізу гідродинаміки і теплообміну, заснований на використанні системи CFD-макро- і мікромоделей, такий, що дозволяє проводити розрахунки теплового стану як всього трансформатора (макромоделі із спрощеною геометрією котушок і каналів), так і окремих довольних груп котушок трансформаторів (мікромоделі з детальною геометрією котушок і каналів). Наведено розрахунки, що ілюструють розглянутий підхід.

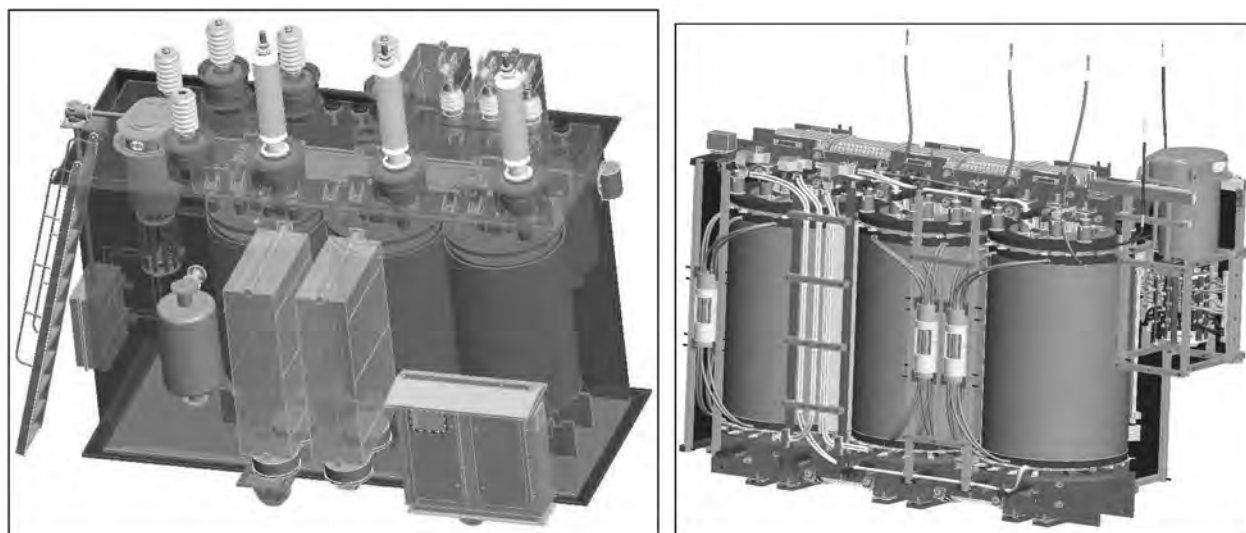
Рассмотрен и проведён сравнительный анализ существующих методов теплового расчёта силовых масляных трансформаторов – методов “перегревов” и теплогидравлических цепей, а также численного метода, основанного на CFD-моделировании. Предложен методический подход к общему и детальному анализу гидродинамики и теплообмена, основанный на использовании системы CFD-макро- и микромоделей, позволяющий проводить расчёты теплового состояния как всего трансформатора (макромоделей с упрощённой геометрией катушек и каналов), так и отдельных производных групп катушек трансформаторов (микромоделей с детальной геометрией катушек и каналов). Приведены расчёты, иллюстрирующие рассмотренный подход.

A comparative analysis of the existing methods for thermal analysis of power oil transformers, i.e., the methods of “overheats” and thermo hydraulic nets as well as the numerical method based on CFD modeling, is considered. An approach for the detailed analysis of hydrodynamics and heat transfer based on the use of CFD system – macro and micromodels is proposed. This approach enables one to carry out thermal analysis of the entire transformer (by means of macromodels with the simplified coils and channels geometry) as well as of any separate groups of transformer coils (by means of micromodels with detailed geometry of coils and channels). We give also the results of calculation illustrating the approach proposed.

Силовые трансформаторы являются основными элементами систем многократной передачи электрической энергии от генерирующего оборудования до конечного потребителя. Важнейшим фактором обеспечения надёжности и долговечности трансформаторного оборудования является эффективный отвод части энергии, выделяющейся в виде теплоты в основных элементах конструкции: в магнитной системе (МС), в обмотках, деталях остова активной части (ярмовые балки,

металлические прессующие кольца, прессующие пластины на стержнях МС), в баке и в других токопроводящих элементах [1 – 4]. Именно эффективность теплоотвода во многом определяет технические, массогабаритные и экономические характеристики трансформатора, а в некоторых случаях и условия его надёжного функционирования в напряжённых режимах эксплуатации [5].

Конструкция силового масляного трансформатора может быть рассмотрена на примере трёх-



а

б

Рис. 1. Общий вид трансформатора (а) и его активной части (б).

мерной модели, разработанной в САD-системе Pro/ENGINEER (рис. 1).

На поверхности бака трансформатора располагаются вводы обмоток, группа наружных теплообменников системы охлаждения (СО). На крышке бака устанавливается дополнительная ёмкость – расширитель с маслом. Внутри бака располагается активная часть (рис. 1, б) в составе МС, обмоток, деталей крепления остова, системы отводов. Если предусмотрено системой регулирования напряжения, вне бака или внутри бака устанавливается переключающее устройство.

С точки зрения конструкции и условий теплообмена различают два типа обмоток [1]: катушечные и цилиндрические. В катушечных обмотках группы проводов из обычного, подразделённого или транспонированного типа дистанцируются между собой по высоте обмотки с помощью прокладок из электрокартона. Прокладки размещаются с определённым шагом по окружности обмотки на поверхности катушек, создавая горизонтальные охлаждающие каналы. Вертикальные охлаждающие каналы образуются расположенными возле обмотки вертикальными изоляционными цилиндрами из электрокартона или бакелита. Между изоляционными цилиндрами и поверхностью обмоток устанавливаются вертикальные рейки из клееного электрокартона, фиксирующие также положение прокладок меж-

ду катушками. Эскиз МС обмоток и группы катушек показан на рис. 2.

Если для группы катушек между поверхностью прилегающих цилиндров и катушками устанавливаются дополнительные перегородки, то это означает, что в обмотке созданы условия для улучшенного теплообмена за счет лабиринтного движения масла. Для улучшения теплообмена по всей высоте обмоток выполняют дополнительные осевые каналы.

Цилиндрические обмотки не имеют горизонтальных каналов. При этом прилегающие цилиндры могут дистанцироваться изоляционными рейками с одной или с двух сторон поверхности обмотки, создавая условия одно- или двухстороннего охлаждения.

Нагретое от поверхности стержней МС и обмоток охлаждающее масло проходит через вертикальные и горизонтальные каналы концевой (яровой) изоляции, смешивается с маслом в баке вне обмоток и попадает через отверстия в баке в патрубки верхнего коллектора СО, дальше охлаждается в охлаждающих устройствах различного типа. Охлаждённое масло попадает через отверстия в баке в зону нижней части обмоток естественным путем или насосами. Между поверхностью обмоток и баком имеется объём масла, в котором происходит дополнительная циркуляция масла [3].

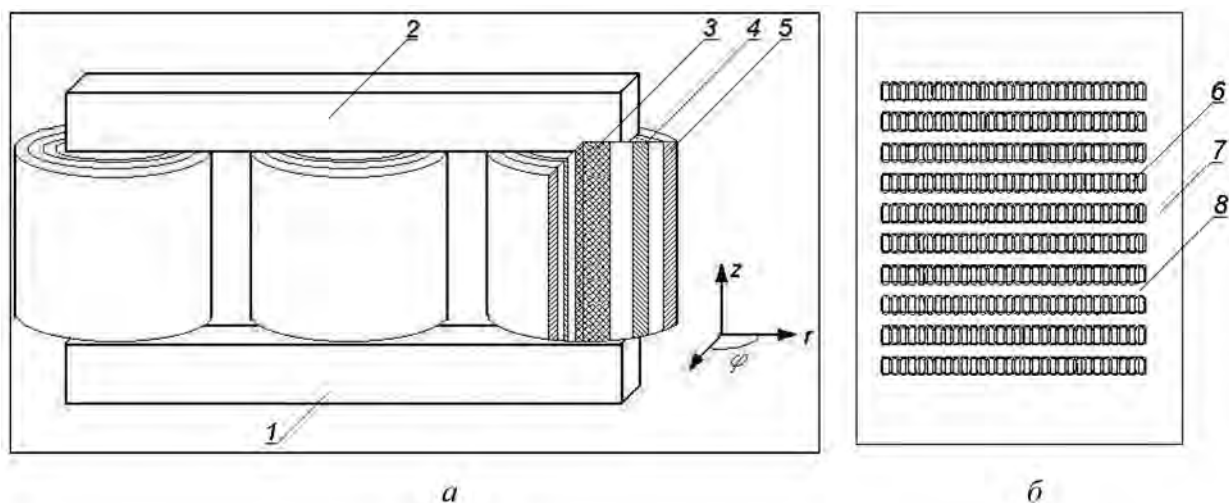


Рис. 2. Схема активной части трёхфазного двухобмоточного трансформатора (а) и группы катушек обмотки с каналами охлаждения (б). 1 – нижнее торцевое ярмо МС; 2 – верхнее торцевое ярмо МС; 3 – стержень МС; 4 – обмотка низшего напряжения (НН); 5 – обмотка высшего напряжения (ВН); 6 – катушки обмотки, 7 – вертикальный канал охлаждения, 8 – горизонтальный канал охлаждения между катушками.

По способу охлаждения различают пять видов СО [1]: естественная циркуляция масла (система М), естественная циркуляция масла и принудительная циркуляция воздуха (Д), принудительная циркуляция масла и воздуха (ДЦ), направленная циркуляция масла в обмотках (НДЦ), принудительная циркуляция масла и воды (Ц). Указанные виды охлаждения создают разные условия теплообмена непосредственно в СО, в баке и в обмотках трансформатора.

Из анализа публикаций известно, что, учитывая всю сложность комплексной задачи достоверного расчёта тепловых параметров трансформаторов, производители трансформаторного оборудования на этапе расчётного проектирования в значительной мере используют результаты экспериментальных исследований физических моделей и натурных испытаний трансформаторов. Это упрощает практическую методику проектирования, например, позволяет разделить или использовать определенную итерационную процедуру последовательных тепловых расчётов системы охлаждения, средних нагревов масла в баке и теплового расчёта активной части (МС, обмоток). При этом обеспечивается определённая достоверность расчётов за счёт стабильных конструктивных решений по МС, обмоткам, СО. Однако область применения таких методик

ограничивается диапазонами изученных параметров основных влияющих факторов, что определяет непрерывную потребность в совершенствовании методик расчётов и максимальном исключении из них эмпирических данных.

Указанные обстоятельства определяют актуальность данной работы и её рассмотрение в направлении обоснования методического подхода к применению так называемого CFD-моделирования, основанного на численном решении полной системы уравнений Навье–Стокса, в максимальной мере учитывающего реальную геометрию составляющих трансформатора и в минимальной мере эмпирические данные о теплообмене и гидродинамике в каналах охлаждения исследуемого трансформатора.

Основы процессов нагрева и охлаждения трансформаторов в целом и его основных частей конструкции (МС, обмотки, бака, СО), а также методы теплового и гидравлического расчёта обмоток, СО рассмотрены в обзорном справочнике [1], книгах [2,3], а также в многочисленных публикациях. В данной работе для анализа использованы работы [6 – 15], содержащие основные методы, которые можно условно классифицировать на следующие четыре группы:

1. Эмпирический метод “перегревов” [6], основанный на использовании усреднённых по

вертикальной и горизонтальной поверхностям катушки эмпирических коэффициентов теплоотдачи с упрощённым учетом температуры масла в месте расположения катушек по высоте обмоток и на суммировании превышений температур поверхности проводников катушек над маслом, перепада температуры по толщине изоляции элементарных проводников и общей изоляции про- вода;

2. Расчётный метод “перегревов”, при котором коэффициенты теплоотдачи определяются расчётным путем [7];

3. Метод термогидравлических цепей как внутри обмоток [8,9], так и для общей теплогидравлической цепи трансформатора, включая СО [10];

4. Методы полевого моделирования тепловых, гидростатических и гидродинамических полей обмоток [10 – 14], основанные на численном решении полной системы уравнений Навье–Стокса при различных дополнительных упрощениях в постановке и решении задачи.

Эмпирический метод “перегревов”, представленный в работе [6] и обзорно в [1], основан на большом массиве экспериментальных исследований теплообмена в модельных и натуральных катушечных и цилиндрических обмотках и является в настоящее время основным для производителей трансформаторов в странах СНГ. В качестве входных данных задаются геометрические параметры трансформатора, коэффициенты теплопроводности отдельных элементов (межслоевой изоляции, изоляции проводов, изоляционных цилиндров), а также такие тепловые характеристики, как средняя температура масла в баке, превышение средней температуры масла в баке и температуры верхних слоёв масла над температурой охлаждающей среды. Эти тепловые данные получаются из отдельного балансового расчёта всей системы, включающей как сам трансформатор, так и внешний теплообменник для охлаждения масла, циркулирующего в системе. Результаты представляются в виде совокупности эмпирических степенных зависимостей превышения средней температуры поверхности обмотки (катушки) над средней температурой масла в баке от ряда режимных и геометрических параметров: плотности теплового потока для рассматриваемой обмотки (катуш-

ки), отношения радиальной ширины обмотки к высоте горизонтального канала между катушками для катушечных обмоток, ширины внутреннего и наружного вертикальных охлаждающих каналов, средней температуры масла в баке и средней скорости принудительного движения масла через бак для наружных обмоток при системах охлаждения ДЦ и Ц. Расчёт выполняется для нескольких характерных зон (блоков катушек) трансформатора. Для обмотки (или отдельных групп катушек) рассчитывается превышение средней температуры поверхности и объёма обмотки над средней температурой масла в баке трансформатора, превышение средней температуры обмотки и Наиболее Нагретой Точки (ННТ) над температурой охлаждающей среды. Однако применимость метода ограничивается изученным диапазоном основных факторов. Упрощённо определяется температура ННТ в обмотке, определяющая нагрузочную способность трансформатора. Получение новых результатов, расширяющих диапазон применения и уточняющих методики методами физического моделирования, в настоящее время требует значительных временных, финансовых (изготовление моделей, испытания) и трудовых затрат, поэтому этот метод далее почти не развивается.

В меньшей степени зависящим от эмпирических данных является расчётный метод “перегревов” [7]. Метод базируется на описании основных физических закономерностей гидродинамики и теплообмена при естественной и вынужденной (смешанной) конвекции жидкости (трансформаторного масла) в вертикальных каналах обмоток с помощью безразмерных критериальных соотношений, в которых только коэффициенты, зависящие от типа и размеров обмотки, определяются на основании опытных данных. Однако метод также упрощённо определяет значение температуры наиболее нагретой точки, так как базовым расчётным элементом является обобщённая модель катушки с усреднёнными потерями по всем проводникам. В то же время известно, что величина потерь в отдельных проводниках по радиальному размеру катушки может значительно отличаться, в силу неравномерного распределения радиальной и осевой составляющей индукции магнитного поля, вызывающих соответствующие

дополнительные потери в проводниках. Ограничением в применении метода также является ограниченный диапазон эмпирических данных по типам и размерам обмоток.

При разработке методов теплового и гидравлического расчётов трансформаторов и реакторов в ряде случаев используются методы эквивалентных теплогидравлических цепей (термогидравлических схем замещения) [8 – 10]. При их использовании сложные многомерные области в сплошных средах, описываемые системами дифференциальных уравнений в частных производных, заменяют нульмерными тепловыми и гидравлическими цепями с сосредоточенными тепловыми и гидравлическими проводимостями, тепловыми ёмкостями [8,9]. Эти цепи описываются системами обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которые в конечном виде заменяются системой алгебраических уравнений для стационарных задач. Применение этих схем существенно упрощает процедуру термогидравлических расчётов, но необходимость использования в них эмпирических, не всегда надёжных и точных данных по коэффициентам местных гидравлических сопротивлений несёт в себе потенциальные ошибки расчёта перепада давлений и расходов в каналах внешнего и внутреннего контуров. Расчёт процессов гидродинамики и теплообмена охлаждающего масла в сложной конструкции силовых трансформаторов обычно производится в два этапа. На первом этапе рассчитывается гидравлическая часть трансформатора с целью определения расходов масла через внешний контур охлаждения и обмотки во внутреннем контуре трансформатора. Как правило, на этом этапе используют так называемые схемы замещения внешнего контура трансформатора для определения расхода масла [10]. На втором этапе по рассчитанным расходам и температурам внутри бака, в обмотках происходит расчёт перегревов отдельных катушек трансформатора [8,9]. Оба эти этапа носят приближённый характер, определяют расчётные величины как усреднённые по достаточно большим неоднородным по физическим свойствам областям.

В работах [11 – 15] и многих аналогичных решается нестационарное уравнение теплопроводности с источниками тепловыделения для ани-

зотропного или изотропного тела с использованием численных методов и с использованием определённых дополнительных допущений. Влияние гидродинамики на процессы теплопереноса и воздействие окружающей среды на тепловые процессы в трансформаторных системах учитывается с помощью коэффициента теплоотдачи. При этом имеющиеся выражения для коэффициентов теплоотдачи, описывающие те или иные экспериментальные данные, не обладают достаточной универсальностью, а входящие в них скорости, как правило, априори неизвестны. Структура течения и величина скоростей предполагается известной из эксперимента, что ограничивает область применения такого подхода для реальных трансформаторов и универсальность полученных результатов.

Одним из возможных способов получения требуемых результатов является применение современных методов математического моделирования совместных процессов гидродинамики и теплообмена в технических устройствах (в частности в трансформаторах) с применением, например, такого программного обеспечения (ПО), как STAR-CD, FLUENT, CFX [16]. С помощью этих программ реализуются так называемые CFD- (Computational Fluid Dynamics) методы (методы вычислительной гидродинамики), основанные на современных компьютерных технологиях, общих универсальных математических моделях процессов переноса теплоты и вещества, а также наборе определённого количества апробированных, эффективных и высокоточных численных алгоритмов. Разработанные CFD-программы позволяют строить CFD-модели, которые представляют собой физико-математическое цифровое представление исследуемого объекта и/или процесса, основанное на численном решении системы уравнений Навье – Стокса и сохранения энергии.

В настоящей работе представляется описание методического подхода к разработке CFD-моделей для расчёта теплового состояния силовых масляных трансформаторов.

Под разработкой CFD-модели подразумевается процесс компьютерного представления таких составляющих CFD-модели, как геометрия исследуемого объекта, оптимальной расчётной сет-

ки, граничных, начальных условий и физических свойств используемых материалов, а также параметров выбора конкретного алгоритма и последующего численного решения полной системы уравнений Навье – Стокса. При использовании CFD-технологий появляется принципиальная возможность использования полной детальной трёхмерной геометрической модели теплообмена в сопряжённой постановке исследуемого объекта без каких-либо существенных упрощений. Сопряжённая постановка задач означает одновременный согласованный расчёт полей температур, скоростей и давлений для всех составляющих исследуемого объекта, что позволяет избежать необходимости в упрощении совместных физических процессов и задании коэффициентов теплоотдачи на поверхностях обтекания твёрдых деталей исследуемой системы жидкостью. Применительно к трансформаторам поля температур могут рассчитываться в произвольном количестве локальных точек.

Таким образом, CFD-модели теплового состояния в сопряжённой постановке лишены недостатков, присущих методикам расчёта усреднённых температур, и потенциально, обладают более высокой точностью, а также значительно большей информативностью. Поэтому вычислительный эксперимент на основе CFD-моделей приближается по своим качествам к натурному эксперименту, а сами модели часто называют виртуальными стендами. CFD-модели, или виртуальные стенды, обладают потенциальными возможностями дополнения либо замены натуральных стендов или натуральных экспериментов для получения новых данных по теплообмену, в частности в виде критериальных зависимостей или практических инженерных методик расчёта.

В связи с вышеизложенным, такие работы являются весьма актуальными, имеют практическую ценность для проектирования и исследования силовых масляных трансформаторов и реакторов с новыми перспективными видами конструкции обмоток и систем охлаждения, могут служить средствами обеспечения выпуска надёжного и конкурентоспособного трансформаторного оборудования.

Тем не менее, при существующей на сегодня производительности вычислительных средств,

расчёт таких сложных многоэлементных систем может занимать многие десятки часов (не принимая во внимание расчёты на далеко не всегда доступных уникальных многопроцессорных кластерах и суперЭВМ). Это не даёт возможности широко использовать эти технологии в условиях конструкторских и проектных подразделений производителей трансформаторного оборудования.

Поэтому в данной работе предлагается методологический подход, позволяющий при доступных вычислительных ресурсах, с помощью построения иерархически упорядоченной взаимосогласованной системы компьютерных моделей оперативно получать требуемые с необходимой степенью детализации интегральные и/или локальные характеристики по тепловому состоянию трансформатора.

Целью работы является разработка методологии построения системы согласованных полевых макро- и микромоделей для численного моделирования теплового состояния силовых масляных трансформаторов, их отдельных обмоток и групп катушек, что позволит с минимальными затратами вычислительных ресурсов и времени получить данные о тепловых и гидродинамических характеристиках как всего силового трансформатора, так и его отдельных деталей.

Суть предлагаемой методики CFD-моделирования теплового состояния силовых трансформаторов состоит из нескольких (как минимум двух) этапов, а именно:

1. Комплексного (внешний и внутренний контуры) гидравлического и теплового расчёта трансформатора с помощью 2- или 3-х мерных CFD-моделей (макромоделей) при упрощённом геометрическом представлении отдельных катушек, горизонтальных каналов охлаждения обмоток и других конструктивных элементов внутри бака с целью возможно более точного получения расхода и температуры масла на входе в бак и отдельные охлаждающие каналы.

2. Последующего более детального расчёта гидродинамики и локального теплообмена в обмотках и каналах охлаждения трансформатора (также на основе 2- или 3-х мерных CFD-моделей), но при более детальном описании геометрии, без внешнего контура охлаждения (микромоделей), с целью более точного получения

локальных температурных полей в катушках и теплообмена в каналах охлаждения, а также с целью детального анализа и возможной оптимизации расположения и параметров каналов охлаждения.

Предполагается, что для систем с вынужденной системой охлаждения такая методика будет также справедливой, т.к. для них характерны более сильные движущие гидродинамические силы.

Задачей полевых макромоделей трансформатора является расчёт теплового состояния силовых трансформаторов в различных режимах их функционирования с учётом всех компонентов: МС, обмоток и внешнего контура СО на качественно новом и более высоком уровне по сравнению с существующей методологией расчёта методом сосредоточенных параметров (тепловых и гидравлических цепей, т.е. нульмерных по пространственным переменным моделей).

Полную трёхмерную компьютерную модель такой сложной нелинейной термогидравлической системы, как реальный силовой масляный трансформатор, можно определить как общую теплогидравлическую макромоделю трансформатора. Она может включать в себя описание геометрии и детальной структуры всех трёх фаз, каждая из которых содержит стержень МС, систему рабочих обмоток. Каждая из обмоток, в свою очередь, состоит из многих десятков (а иногда и сотен) катушек. Внутри моделей обмоток должны быть представлены вертикальные и горизонтальные каналы чередующейся высоты с дистанционирующими элементами в виде прокладок и реек. В полной модели должны присутствовать металлические и неметаллические детали конструкции активной части, бака, а также контур внешнего охлаждения горячего масла. Расчёт такой модели на сегодня не представляется возможным. Поэтому предлагается за счёт некоторого упрощения модели уменьшить её сложность, время её исследования (расчёта) на доступных современных компьютерах. Однако такая модель должна обеспечить получение достоверных основных интегральных характеристик системы — расходов, температуры и профилей скорости на выделенных поверхностях. В реальной обмотке процессы теплопереноса происходят путём совместного конвективно — кондук-

тивного переноса, а сами обмотки представляют собой слоистую анизотропную или ортотропную среду. Скорость движения масла при свободной конвекции в горизонтальных межкатушечных каналах обмотки крайне незначительна, порядка 10^{-3} м/с, поэтому теплоперенос внутри обмотки может быть смоделирован с помощью эквивалентного кондуктивного механизма с некоторыми эффективными (эквивалентными реальным процессам и учитывающим конвекцию) характеристиками (коэффициентами) переноса. При этом в каждой обмотке не рассматриваются отдельные межкатушечные каналы и дистанционирующие элементы (прокладки и рейки), а теплофизические характеристики (плотность, теплоёмкость и теплопроводность) отдельной обмотки выбираются так, чтобы тепловое состояние обмотки в среднем соответствовало реальному процессу теплообмена. Таким образом, для целей моделирования на уровне макромоделей обмотка представляется эквивалентным сплошным твёрдым телом, т.е. отличительной особенностью макромоделей является описание и расчёт обмотки как единого целого (ортотропное или анизотропное неоднородное твёрдое тело) без отдельного рассмотрения конвекции в межкатушечных горизонтальных каналах и детальной структуры катушек с изоляцией и дистанционирующими прокладками.

Как указано ранее, задачей макромоделей является описание и общий расчёт теплогидравлических процессов всего трансформатора с обязательным учётом всех (основных и дополнительных) тепловыделений, имеющих место в трансформаторе.

С учетом симметрии физических процессов в объеме трехфазного трансформатора рабочей макромоделю может быть трёхмерная модель, охватывающая 1/4 объема трансформатора, заключённого между двумя вертикальными плоскостями, одна из которых проходит через оси трёх стержней магнитопровода, а другая — перпендикулярно к ней через ось среднего стержня. В канале, соединяющем бак и контур внешнего охлаждения, могут присутствовать пористые участки, за счёт изменения эффективной пористости которых можно учитывать (имитировать) реальные гидравлические сопротивления в трубопроводах между баком и радиаторами, а также в самих радиаторах.

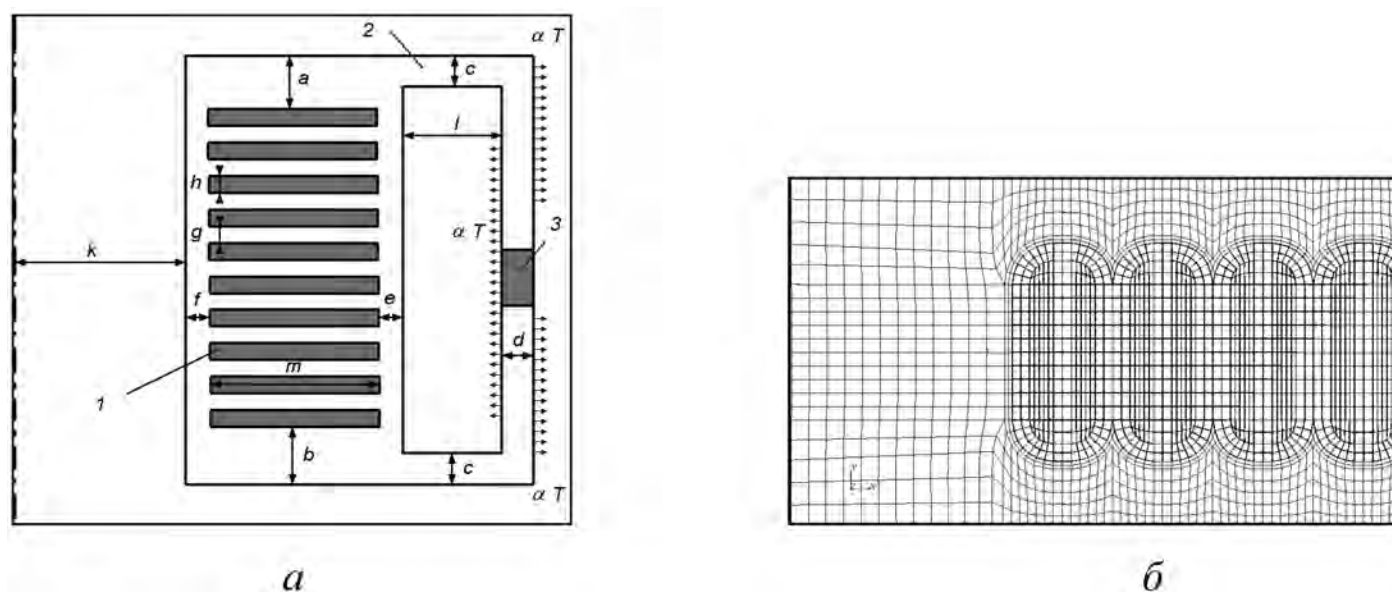


Рис. 3. Геометрия области решения (а) и расчётной сетки в области проводов (б) фрагмента трансформатора с внешним контуром: 1 – катушки; 2 – масло в баке; 3 – внешний контур с регулируемым гидравлическим сопротивлением.

Полученные на первом этапе результаты (прежде всего расход и температура масла на входе в бак и отдельные обмотки) должны быть использованы в качестве начальных и/или граничных условий при моделировании процессов тепломассопереноса, например, для задачи нагрева стержня МС или для детально представленной микромоделю произвольных групп катушек обмоток.

Для апробации предложенной методологии были построены ряд простых и более сложных полевых CFD-моделей, которые позволили провести анализ полей температур и скоростей в катушках, отдельных проводах и её изоляции, а также каналах охлаждения фрагментов обмоток трансформатора мощностью 25 МВА с наиболее сложной для расчётов естественной (М) системой охлаждения с внешним и без внешнего контура охлаждения трансформаторного масла.

В качестве макромоделю была выбрана двумерная осесимметричная CFD-макромоделю фрагмента трансформатора, представляющая собой фрагмент обмотки, состоящий из 10 катушек, помещенных в бак, который имеет внешний контур (систему охлаждения) (рис. 3). На поверхности системы охлаждения (внешних радиаторах-теплообменниках) заданы условия теп-

лообмена с внешней средой 3-го рода, т.е. коэффициент теплоотдачи и температура внешней среды. Каждая катушка состоит из 30 витков. Физические характеристики трансформаторного масла в зависимости от температуры брались из [3].

На рис. 4 приведены поля температур и линий тока при движении масла в макромоделю фрагмента трансформатора. Анализ поля скоростей, представленного на рис. 4, б, позволяет отметить максимально достигнутую в установившемся режиме скорость движения масла (около 2 мм/с), а также показывает симметричную картину движения масла в обмотке с постепенным увеличением глубины циркуляции (проникновения в горизонтальные каналы) масла к центру катушек, максимальная интенсивность которого достигается в верхней катушке.

Была также построена аналогичная CFD-микромоделю, но уже без внешнего контура с заданным на входе в бак расходом масла, определённым из расчёта для макромоделю с внешним контуром. На входе задавался расход $9,69 \cdot 10^{-7}$ кг/с и температура масла 326,9 К, найденные с помощью макромоделю. На выходе из бака было задано условие свободного выхода. Все остальные параметры моделей для бака и обмотки оставались прежними.

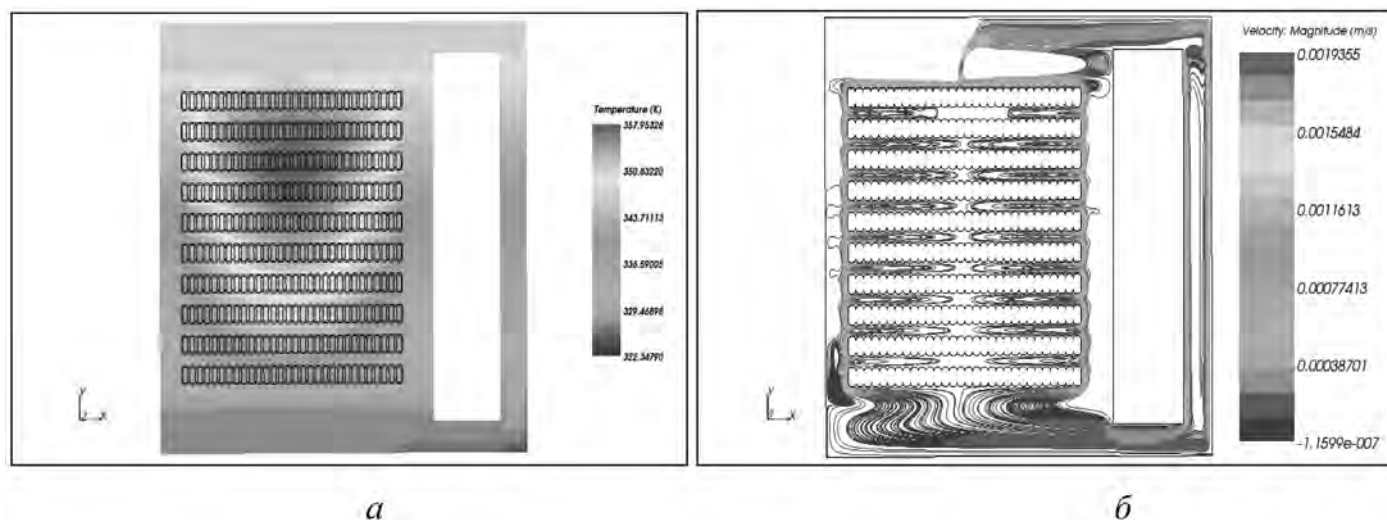


Рис. 4. Поле температур (а) и линий тока движения масла (б) в макромодели фрагмента трансформатора.

Средняя температура масла на выходе из бака, определенная по макромодели составляет $77,68\text{ }^{\circ}\text{C}$, а по микромодели – $77,12\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднеобъемная температура масла в баке по результатам расчёта макромодели составляет $68,69\text{ }^{\circ}\text{C}$, а микромодели – $68,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, максимальная температура катушек макромодели – $84,80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а микромодели – $84,20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поле скоростей также совпадает.

Таким образом, поле температур и скоростей в микромодели без внешнего контура при заданных на входе в бак расходе и температуре масла, найденных из расчётов по макромодели с внешним контуром, будут совпадать с точностью $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выводы

1. Рассмотрен и проведён сравнительный анализ существующих методов теплового расчёта катушек и обмоток силовых масляных трансформаторов – “эмпирический и расчётный методы перегревов”, метод теплогидравлических цепей, численные методы с заданием граничных условий третьего рода и метод, основанный на CFD-моделировании.

2. Анализ гидродинамики обтекания и теплообмена фрагментов трансформатора при естественной конвекции можно проводить с помощью CFD-технологий без введения упрощений, свойственных традиционным методикам, что позволяет выполнять более детальное и точное проек-

тирование и оптимизацию параметров трансформаторов. При использовании CFD-технологий нет необходимости в использовании эмпирических коэффициентов теплоотдачи на различных поверхностях катушек и каналов охлаждения, а также коэффициентов гидравлических сопротивлений отдельных каналов по ходу масла. Эти коэффициенты могут быть получены из результатов CFD-моделирования и используются для целей верификации компьютерной модели.

3. На основе использования CFD-моделей предложен методический подход к детальному анализу гидродинамики и теплообмена в каналах охлаждения катушек и обмоток силовых масляных трансформаторов, основанный на использовании системы CFD-моделей двух уровней (макро- и микромоделей), позволяющих проводить расчёты теплового состояния как всего трансформатора (макромодели с упрощённой геометрией катушек и каналов), так и отдельных произвольных групп катушек трансформаторов (микромодели с детальной геометрией катушек и каналов). Показана справедливость такой методологии микро- и макромоделей при моделировании упрощённой модели трансформатора с фрагментом обмотки из 10 катушек с каналами охлаждения, что даёт возможность её применения для исследования реальных конструкций трансформаторов.

4. Разработанные модели и методики численного моделирования нагрева катушечных обмоток масляных трансформаторов могут быть использованы для уточнения (совершенствования) практических инженерных методик в расширенных диапазонах основных влияющих факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Силовые трансформаторы*. Справочная книга. – М.: Энергоиздат, 2005. – 614 с.

2. *Готтмер Г.* Нагревание и охлаждение электрических машин: Пер. с нем. Под ред. В.В. Мальцева. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.

3. *Киш Л.* Нагрев и охлаждение трансформаторов / Пер. с венгерского. Под ред. Г.Е. Тарле. – М.: Энергия, 1980. – 208 с., ил. – (Трансформаторы; Вып. 36).

4. *Шидловский А.К., Воеводин И.Д., Мелешко Ю.И.* Основные тенденции развития трансформаторостроения за рубежом. – К.: Институт электродинамики АН УССР, 1986. – 32 с. (АН УССР. Ин-т электродинамики; препр. – 479).

5. *Федоренко Г.М., Соколов В.В., Зозуля Д.В., Гура Ю.Л.* Трансформаторное оборудование АЭС Украины, его надёжность, техническое состояние и ресурс // *Праці Інституту електродинаміки НАН України №1(16), частина 1*, К.: Інститут електродинаміки НАН України. – 2007. – С. 76–82

6. *Воеводин И.Д., Михайловский Ю.А., Черноготский В.М., Швидлер А.Б., Тарле Г.Е., Люблин И.Ш.* Методы расчёта превышений температуры обмоток силовых трансформаторов // *Трансформаторы: Перенапряж. и координация изоляции*. Пер. докл. Междунар. конф. по больш. электр. системам СИГРЭ – 84. – М.: – 1986. – С. 190–198.

7. *Дулькин И.Н., Люблин И.Ш.* Метод теплового расчёта обмоток силовых масляных трансформаторов // *Электротехника*. – 1997. – №2. – С. 16 – 22.

8. *Oliver A.J.* Estimation of transformer winding temperatures and coolant flows using a general net-

work method // *IEE Proc.*, Vol. 127, Pt. C, No. 6, November 1980. – P. 395 – 405.

9. *Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah and Rajendra Ahuja.* Transformer design principles: with application to core-form transformers. – Gordon and Breach Science Publishers, 2001. – 599 p.

10. *Seitlinger Walter.* Thermo- Hydraulic transformer model. VA TECH Elin Transformatoren GmbH. 2000. <http://www.vatechtd.com>.

11. *Mufuta J.-M., Eric van den Bulck.* Modelling of the mixed convection in the winding of a disc- type power transformer // *Applied Thermal Engineering* 20 (2000). – P. 417 – 437. <http://www.elsevier.com>.

12. *Кучерявая И.Н.* Численное исследование влияния различных факторов процесса теплообмена на эффективность охлаждения трансформаторно-выпрямительных модулей // *Техн. электродинамика*. – 2000. – № 3. – С. 56 – 61.

13. *Козлов В.В.* Підвищення ефективності примусового охолодження високовольтних масляних трансформаторів: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.09.01 / Нац. техн. ун-т “Харк. політехн. ін-т”. – Х., 2004. – 19 с.

14. *Рассальский О.М.* Аналіз і розрахунок теплових режимів силового електроустаткування: / М-во освіти і науки України, Запоріж. нац. техн. ун-т. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 144 с.

15. *Одаренко Ю.М.* Розвиток методів подібності при теплообміні в охолоджуючих каналах обмоток трансформаторів для удосконалення їх теплового захисту. Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.06 / Дніпродзержинський держ. техн. ун-т. – Дніпродзержинськ: 2006. – 19 с.

16. *Tanguy A., Patelli J.P., Devaux F., Taishe J.P., Ngnegueu T.* Thermal performance of power transformers: thermal calculation tools focused on new operating requirements. Presented at CIGRE Session, CIGRE, Paris, France, Session 2004, Report Nr. A2-105.

Получено 17.10.2008 г.