

УДК 532.542:536.252/255:621.314.212

Яцевский В.А., Хуторный В.М., Круковский П.Г.*Институт технической теплофизики НАН Украины*

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С ВНЕШНЕЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ МАСЛА

За допомогою розроблених CFD – моделей у спряженій постановці проведено аналіз особливостей гідродинаміки і теплового стану силових масляних трансформаторів в умовах природної конвекції трансформаторного масла.

С помощью разработанных CFD – моделей в сопряжённой постановке проведён анализ особенностей гидродинамики и теплового состояния силовых масляных трансформаторов в условиях естественной конвекции трансформаторного масла.

By developed CFD – models as a conjugate problem the analysis of features of hydrodynamics and thermal state is conducted for power oily transformers under oil natural convection condition.

Проблемы расчётного анализа теплового состояния силовых масляных трансформаторов при естественной конвекции масла в системе являются актуальными для дальнейшего совершенствования и оптимизации теплового состояния трансформаторного оборудования [1,2]. Такая оптимизация связана как с интенсификацией внутреннего теплообмена в баке, так и с подбором энергоэффективной системы внешнего охлаждения трансформаторного масла (радиаторов). Современные CFD-модели и технологии позволяют с учётом реальных нелинейных физических свойств и неоднородных по пространству тепловыделений наиболее полно и детально рассчитывать и анализировать как традиционно используемые конструкторами усреднённые превышения температур поверхностей и объёмов обмоток и масла, так и достаточно точно определять локализацию и значение температур наиболее нагретых точек. Последняя задача, как известно, определяет интенсивность термической деструкции целлюлозной изоляции, надёжность и суммарный срок службы масляных трансформаторов.

Большинство опубликованных работ, посвящённых этой проблеме, рассматривают отдельно системы внутреннего и внешнего охлаждения трансформаторного масла. Но для часто применяемой системы с естественной циркуляцией масла (системы типа М и Д) априори рас-

ход масла неизвестный, – он определяется нагрузкой (тепловыделениями) трансформатора. В замкнутом контуре циркуляции масла возникает подъёмная сила, обусловленная разностью плотностей холодного и нагретого масла, которая уравнивается гидравлическим сопротивлением многочисленных каналов внутри бака трансформатора и внешней системы охлаждения. Одним из важных параметров в данной задаче является взаимное расположение радиаторов по отношению к активной части трансформатора, определяемое разностью высот теплового центра активной части и теплового центра радиаторов.

Типовые конструкции реальных современных силовых высоковольтных масляных трансформаторов состоят из порядка 100 узлов (элементов конструкции) [3], в том числе нескольких обмоток в каждой фазе, магнитной системы (МС), включающей стержни и ярмовые балки, системы изоляции, прессующей системы магнитопровода и обмоток (металлические прессующие кольца, прессующие пластины на стержнях МС), электрических экранов и ферромагнитных шунтов в баке, выполненных из меди или алюминия, электрических шин, вводов и отводов, рёбер жёсткости, токоограничивающих реакторов.

При этом из соображений электрической прочности некоторые узлы конструкции

трансформатора выполняются таким образом, что с точки зрения гидродинамики они представляют собой пористые элементы. Например, у трансформаторов на напряжение 100 кВ и более угловые шайбы барьерной изоляции выполнены из листов электрокартона толщиной 0,5...1 мм, которые прорезаны с одной стороны на глубину 200...300 мм через каждые 50 мм и образуют, таким образом, ленты, которые заправляются за барьерную изоляцию [4]. При этом неразрезанная часть листов находится под прессующим кольцом, а количество слоёв электрокартона в угловых шайбах, уложенных с перекрытием, может достигать до десяти.

При рассмотрении и анализе теплового состояния в силовом масляном трансформаторе с учётом присоединённого внешнего теплообменника (радиаторов) происходят следующие теплофизические процессы:

- выделение потерь холостого хода в магнитопроводе и нагрузочных джоулевых потерь (потерь короткого замыкания) в обмотках, отводах и других металлических узлах трансформатора. Удельные потери в стали магнитопровода зависят от марки стали, толщины листов, качества сборки и магнитной индукции. Далее происходит передача этих тепловыделений путём теплопроводности к поверхностям соответствующих элементов, соприкасающихся с маслом;

- конвективная теплоотдача с твёрдых поверхностей в охлаждающие вертикальные каналы обмоток к теплоносителю – циркулирующему трансформаторному маслу;

- перенос сгенерированной внутри бака теплоты, обусловленной всеми видами потерь в трансформаторе, циркулирующим потоком масла во внешний теплообменник;

- теплопередача этого теплового потока во внешнем теплообменнике от трансформаторного масла в окружающую среду (как правило, к наружному воздуху, в некоторых системах охлаждения – к охлаждающей воде).

Таким образом, в замкнутом контуре циркуляции масла поддерживается гравитационное давление и возникает подъёмная сила, обусловленная разностью плотностей холодного и на-

гретого масла. Гравитационное давление уравновешивает возникающее при циркуляции масла гидравлическое сопротивление.

Тепловой поток, передаваемый во внешнем теплообменнике (маслоохладителе) в стационарном режиме к окружающей среде (воздуху) при постоянной (неизменной) температуре воздуха, остаётся неизменным и равным полным электрическим и магнитным потерям трансформатора.

В условиях конструкторских и проектных подразделений производителей трансформаторов все рассмотренные выше особенности теплообменных процессов в трансформаторах не могут быть учтены одновременно и детально с помощью современных CFD-технологий, т.к. получаемые CFD-модели достаточно сложные, громоздкие и требуют продолжительного времени для расчётов и анализа.

В данной работе с помощью построения иерархически упорядочённой взаимосогласованной системы компьютерных моделей предлагается оперативно получать требуемые с необходимой степенью детализации интегральные и/или локальные характеристики по тепловому и гидродинамическому состоянию трансформатора. Применительно к трансформаторостроению вводятся два класса CFD-моделей:

- 1) макромодели, которые используются при упрощённом геометрическом представлении отдельных узлов внутри бака с целью максимально точного получения расхода и температуры масла на входе в бак и отдельные вертикальные охлаждающие каналы;

- 2) микромоделей, которые при более детальном описании реальной геометрии отдельных узлов и деталей используются при последующем расчёте гидродинамики и локального теплообмена в катушках обмоток и каналах охлаждения трансформатора.

В макромоделях одновременно с анализом теплового состояния активных элементов маслonaполненных трансформаторов, помещённых в бак, определяется также количество

теплоты, отводимой радиаторами системы внешнего охлаждения и поверхностью бака. При этом возможен анализ и выбор вариантов конструктивного исполнения и расположения таких радиаторов.

Используемый в работе CFD-подход с необходимой степенью детализации учитывает теплогидравлические процессы в трансформаторе, которые описываются системой уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости (уравнения сохранения массы, движения, а также уравнение сохранения энергии). На всех твёрдых поверхностях, контактирующих с маслом, заданы условия прилипания, т.е. равенство нулю компонентов скорости и сопряжённые тепловые граничные условия (четвёртого рода). На внешней поверхности системы охлаждения (внешнем контуре) и на поверхности бака трансформатора заданы условия конвективного теплообмена с внеш-

ней средой (нелинейный коэффициент теплоотдачи и температура внешней среды). Система уравнений Навье-Стокса решается численно с помощью метода контрольного объёма. При построении компьютерной модели производилось сгущение сетки в местах (как правило, вблизи поверхностей теплообмена), где имели место наибольшие градиенты зависимых переменных.

На рис. 1 и рис. 2 представлены поля скоростей и температур в макромодели. Поле скоростей очень неоднородно, наблюдается существенная скоростная неравномерность потоков масла, а в ряде мест образуются локальные вихреобразные структуры и зоны рециркуляции. Как видно из рис. 2 максимальные температуры локализованы в верхней торцевой части обмотки. Максимальная температура потоков масла в области решения наблюдается для выходящих сверху охлаждающих каналов обмоток.

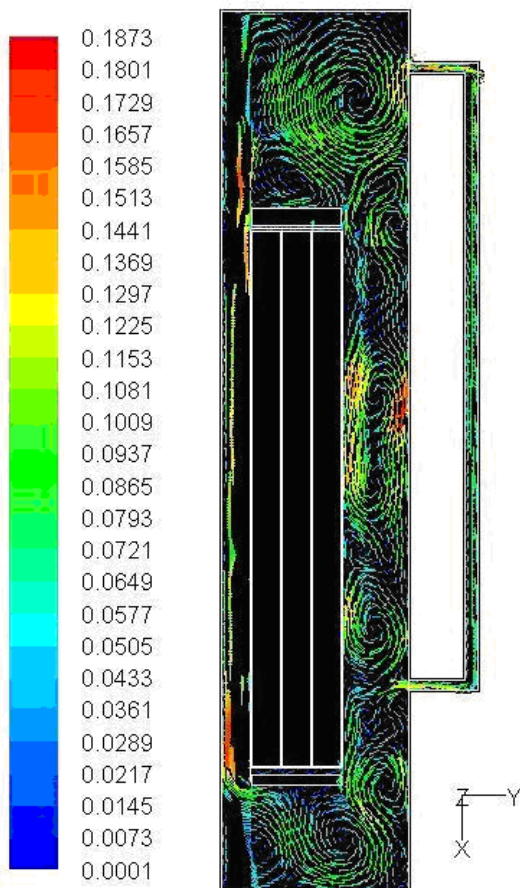


Рис. 1. Поле скоростей в макромодели.

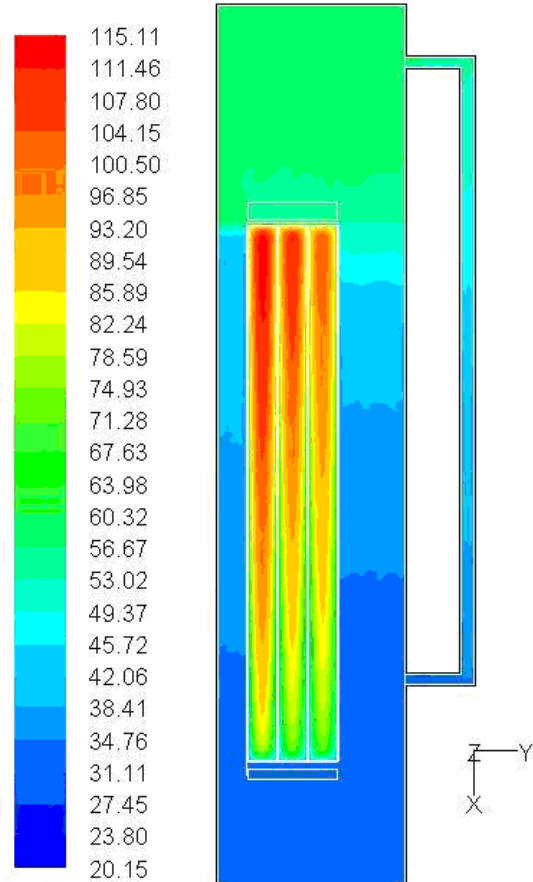


Рис. 2. Поле температур в макромодели.

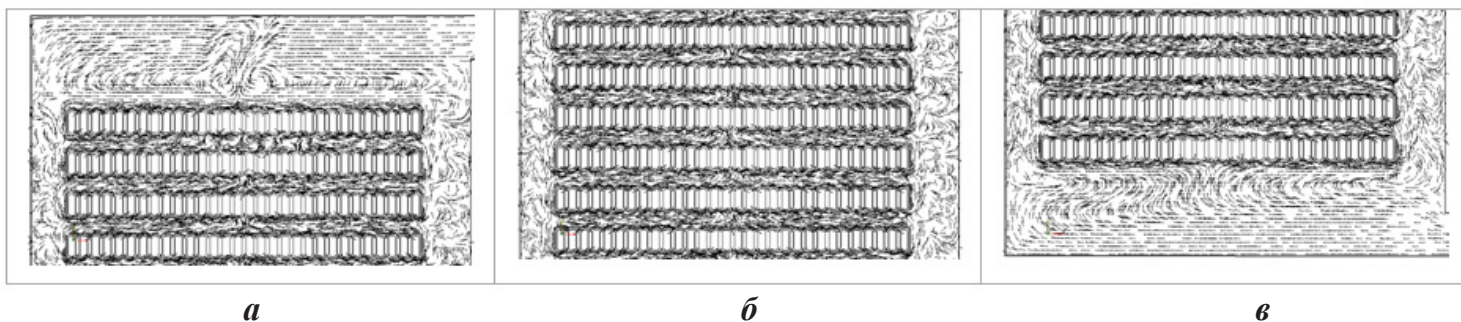


Рис. 3. Поле скорости в отдельных частях микромодели фрагмента трансформатора в верхней (а), средней (б) и нижней (в) частях.

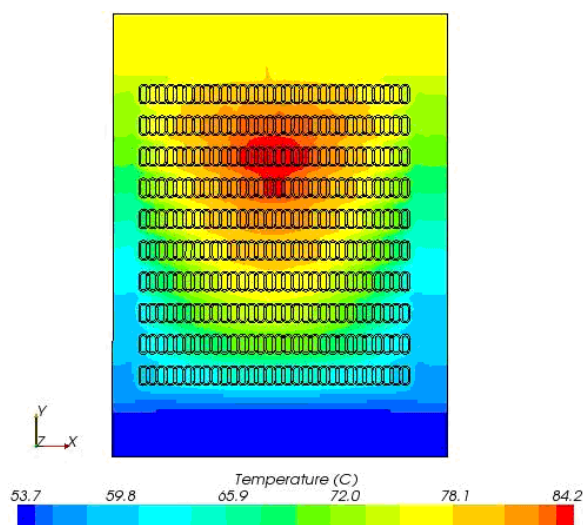


Рис. 4. Поле температур в микромодели катушек трансформатора.

Температура масла в пространстве между наружными поверхностями активной части трансформатора и стенками бака существенно ниже температуры масла в верхней торцевой зоне над обмотками ("верхнее" масло). В нижней торцевой зоне под обмотками расположено холодное масло с относительно низкой температурой, которое слабо участвует в процессе циркуляции.

В случае необходимости более детального расчёта и последующего анализа теплогидравлических процессов и физических параметров в трансформаторе предлагается использовать микромодели отдельных фрагментов (частей) при более детальном и тщательном описании их геометрии. При этом граничные условия на границах области решения рассматриваемых

фрагментов оборудования определяются из решения макромоделей всего трансформатора. На рис. 3 представлены поля скоростей в отдельных зонах микромодели десяти катушек трансформатора, учитывающих горизонтальные каналы, провода и изоляцию проводов. Детальное поле скоростей в разных частях катушек, представленное на рис. 3, существенно неоднородно. В ряде мест наблюдаются локальные вихреобразные структуры и зоны рециркуляции. На рис. 4 представлено температурное поле десяти катушек трансформатора, из которого можно определить значение максимальной температуры (наиболее нагретую точку) и её локализацию с точностью до конкретного витка катушки.

Выводы

Рассмотрены особенности гидродинамических и тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах с учётом наличия внешних систем охлаждения, которые демонстрируют сложный нелинейный характер этих процессов.

С помощью компьютерного моделирования может быть обнаружено образование застойных зон, зон отрывов и рециркуляции масла в баке трансформатора, а также подготовлены предложения по их устранению или минимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Программное* обеспечение проектирования трансформаторов и реакторов / Паук Ю.И., Дорогокупля В.А., Желонин В.А., Кравченко С.В., Лазарев В.И., Остренко М.В., Гар-

чуткин А.Л., Черноготский В.М. // Международная научно-техническая конференция "Силовые трансформаторы и системы диагностики. 23-24 июня 2009 г., М.: 2009.

2. *Рассальський О.М.* Аналіз і розрахунок теплових режимів силового електроустановки. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – 144 с.

3. *Алексеев Б.А.* Трансформаторы типа DRYFORMER с кабельной обмоткой – новая разработка компании АВВ // Электро: электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2003. – № 2. – С. 13-16.

4. *Анализ* методов оценки ресурса бумажной изоляции силовых трансформаторов / Бондарева В.Н., Ершов Б.Г., Комаров В.Б., Львов М.Ю., Львов Ю.Н., Рубцов А.В. // Международная научно-техническая конференция "Силовые трансформаторы и системы диагностики. 23-24 июня 2009 г., М.: 2009.

Получено 18.11.2009 г