

5. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.
6. Хамухин А.А. Ячеечная модель устройства для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 63–67.
7. Хамухин А.А. Реконфигурирование однородной вычислительной структуры с непрограммируемыми ячейками для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 5. – С. 68–72.
8. Хамухин А.А. Модификация ячейки однородной структуры для решения дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 5. – С. 37–41.
9. Хамухин А.А. Адресуемая ячейка однородной вычислительной структуры для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 5. – С. 25–30.
10. Хамухин А.А. Математическая модель ячейки однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Проблемы информатики. – 2011. – № 5. – С. 87–93.
11. Хамухин А.А. Применение ячеек однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 5. – С. 149–153.
12. Устройство для вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования: пат. 2437147 Рос. Федерация. № 2010127068/08; заявл. 01.07.10; опубл. 20.12.11, Бюл. № 35. – 9 с.

Поступила 21.09.2012 г.

УДК 621.312/313: 621.317.31

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КООКСИАЛЬНОГО ШУНТА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

Е.В. Бедарева, Е.В. Костин

Томский политехнический университет  
E-mail: bedareva@tpu.ru

*Проведен анализ распределения температурного поля коаксиального шунта в программном пакете ANSYS. Установлено, что температурное поле коаксиального шунта имеет неравномерный характер из-за теплоемкости материалов и свободной конвекции. Предложено использовать систему принудительного охлаждения шунта, которая позволит уменьшить внутренние механические напряжения резистивного элемента и улучшить метрологические характеристики шунта в целом.*

**Ключевые слова:**

*Коаксиальный шунт, распределение температурного поля, температура перегрева резистивного элемента, метод конечных элементов, ANSYS.*

**Key words:**

*Coaxial shunt, temperature field distribution, superheat temperature of resistance element, finite-element method, ANSYS.*

При испытаниях электроэнергетического оборудования, такого как мощные трансформаторы, силовые размыкатели, коммутаторы, защитные устройства, а также при контактной сварке и нанесении покрытий методом микродугового оксидирования применяют резистивные преобразователи тока. Предпочтения отдают коаксиальной конструкции шунтов, обладающих наиболее стабильными метрологическими характеристиками [1–3]. Коаксиальный шунт состоит из двух вложенных друг в друга цилиндров, по которым протекает ток в противоположных направлениях. Внутренний цилиндр является резистивным элементом, выполненным из материала с малым удельным сопротивлением, например манганин, а внешний — из материала с большим удельным сопротивлением, например медь.

Расчет параметров коаксиальных шунтов состоит в определении оптимальных размеров и рациональном выборе материала резистивного элемента, которые должны обеспечивать заданные технические и метрологические характеристики шунта при минимальных габаритах.

Основным фактором, определяющим размер резистивного элемента, является пропускаемый им ток и, следовательно, мощность рассеиваемого им тепла. Поэтому при выборе его габаритных размеров необходимо учитывать температуру перегрева [4]. Под температурой перегрева понимается разность между температурой поверхности резистивного элемента и температурой окружающей среды.

Температурное поле коаксиального шунта описывается сложными дифференциальными уравнениями, получение аналитического решения которых вызывает затруднения, особенно при рассмотрении трехмерного случая. Целью данной статьи является исследование температурного поля коаксиального шунта с помощью разработки модели в программном пакете ANSYS.

В настоящее время существует множество программных продуктов, позволяющих провести сложные модельные эксперименты по расчету распределения температурного поля резистивных шунтов и уменьшить трудоемкость натурных экс-

периментов. Для решения поставленной задачи была выбрана система ANSYS, реализующая метод конечных элементов (МКЭ), применение которого позволяет с высокой точностью рассчитать тепловое поле коаксиального шунта, имеющего относительно сложную геометрическую конструкцию. Основными этапами расчета в программном комплексе ANSYS являются:

- 1) построение геометрии исследуемого объекта;
- 2) ввод свойств материалов;
- 3) формирование граничных условий;
- 4) генерация сетки конечных элементов;
- 5) проведение расчета;
- 6) визуализация и анализ результатов.

Реализация этапа 1 осуществляется в рамках модуля DesignModeler или CAD-программах, этапа 2 – на платформе Ansys Workbench в рамках модуля Engineering Data, этапов 3–6 – в рамках модуля Multiple Systems [5].

Исследование температурного поля коаксиального шунта – нетривиальная задача из-за наличия внутренних источников теплоты, вызванных прохождением тока в шунте. При исследовании переноса теплоты в таких случаях важно знать интенсивность объемного выделения теплоты, так называемое джоулево тепло [3].

В программном комплексе ANSYS определение джоулева тепла проводится посредством модуля расчета электрических параметров Electric, который также позволяет учитывать теплоемкость материалов коаксиального шунта. Для получения распределения температурного поля шунта, кроме модуля Electric, необходимо использовать модуль расчета параметров переходных тепловых процессов Transient Thermal [6]. Рис. 1 иллюстрирует взаимосвязь используемых расчетно-графических модулей Workbench.

Рассмотрим подробно методику расчета температурного поля коаксиального шунта.

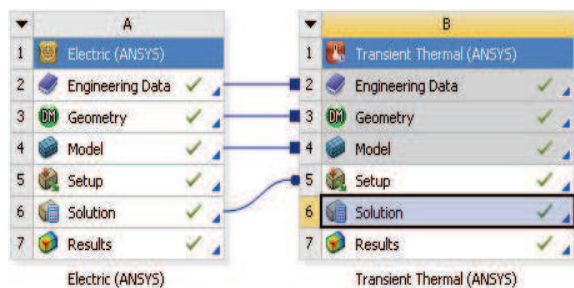


Рис. 1. Взаимосвязь используемых при моделировании расчетно-графических модулей Electric и Transient Thermal

Этап 1. Построение геометрии исследуемого объекта

Разработка конструкции коаксиального шунта возможна с помощью модуля DesignModeler или импорта готовой геометрии из CAD-программ. В рассматриваемом случае наиболее эффективным оказалось создание геометрии коаксиального шунта в CAD-программе, а именно в графическом пакете Inventor 2011. Конструкция исследуемого коаксиального шунта представлена на рис. 2.

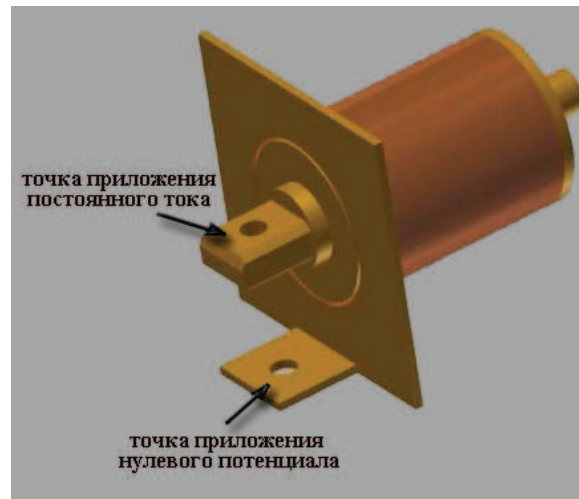


Рис. 2. Конструкция исследуемого коаксиального шунта

Этап 2. Ввод свойств материалов

Ввод свойств материала проводится с помощью модуля Engineering Data. Данный модуль содержит базу данных свойств различных материалов, в том числе теплоемкость, удельное сопротивление и т. д. Эта база может дополняться и изменяться пользователем. В процессе моделирования в базу были добавлены свойства манганина посредством следующей последовательности операций: Engineering Data → Edit → A2 → ввод названия материала → выбор необходимых свойств материала → + → Refresh Project → Return to Project. Необходимо отметить, что перечень доступных свойств материалов зависит от выбранного типа используемых расчетно-графических модулей.

Этап 3. Формирование граничных условий

Основным этапом в процессе получения решения любого модуля является правильное формирование граничных условий. От значений граничных условий зависит размерность расчетной области (число расчетных точек и конечных элементов).

Граничными условиями для модуля Electric являются значение постоянного тока 2 кА, приложенного к токовому выводу, и нулевое значение потенциала на выводе заземления, как представлено на рис. 2.

Первым граничным условием для модуля Transient Thermal является решение, полученное в модуле Electric, а именно распределение джоулева тепла, которое импортируется в этот модуль следующей последовательностью действий: Electric → Solution → Transfer Data to New → Transient Thermal.

Вторым граничным условием при расчете температурного поля является часть поверхности шунта, подвергаемая естественному охлаждению, которое осуществляется за счет свободного перемещения воздуха в окружающей среде [6]. При естественном охлаждении тепло от резистивного элемента коаксиального шунта передается в окружающую среду в основном конвекцией и частично за счет тепло-

проводности внешней медной трубки, токоподводов, крепежных деталей. Таким образом, в качестве второго граничного условия выбрана вся внешняя поверхность моделируемого шунта (рис. 3).

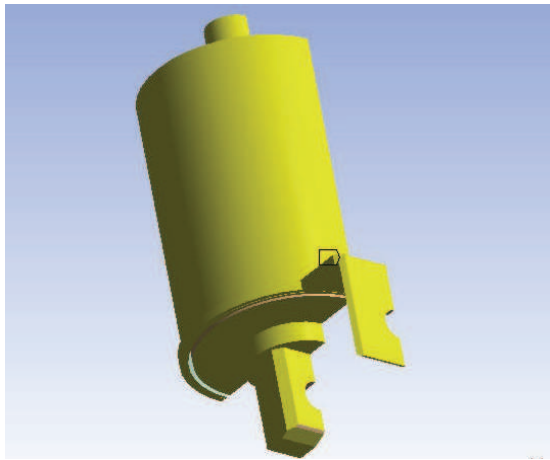


Рис. 3. Внешняя поверхность шунта при естественной конвекции

Этап 4. Генерация сетки конечных элементов

При разбиении расчетной области на конечные элементы в процессе исследования температурного поля коаксиального шунта использовалась стандартная сетка, для которой был задан размер конечных элементов 0,01. При этом число расчетных узлов (Nodes) составило 111751, число элементов (Elements) – 19163, что позволило достичь приемлемого качества решения. Сгенерированная сетка модели коаксиального шунта представлена на рис. 4.

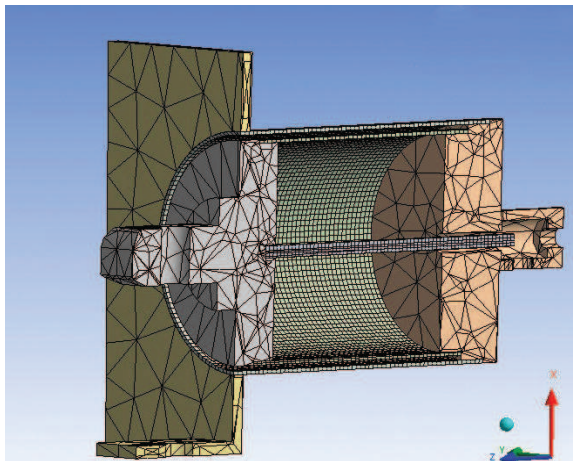


Рис. 4. Сгенерированная сетка коаксиального шунта

Этап 5. Проведение расчета

Из множества параметров, предлагаемых программным комплексом ANSYS для определения температурного поля коаксиального шунта, были выбраны следующие:

- Джоулево тепло (в модуле Electric Joule Heat);
- Температура (в модуле Transient Thermal Temperature).

Определение джоулева тепла и распределения температурного поля осуществлялось для всей поверхности коаксиального шунта.

Этап 6. Визуализация и анализ результатов

Визуализация результата расчета джоулева тепла для всей конструкции коаксиального шунта в модуле Electric представлена на рис. 5. Как отмечалось выше, полученное решение является граничным условием для модуля Transient Thermal. Как видно из рис. 5, при подаче постоянного тока 2 кА в центральной (светлой) области А джоулево тепло распределяется равномерно по всему резистивному элементу вследствие предположения, что ток протекает по телу резистивного элемента равномерно с постоянной плотностью.

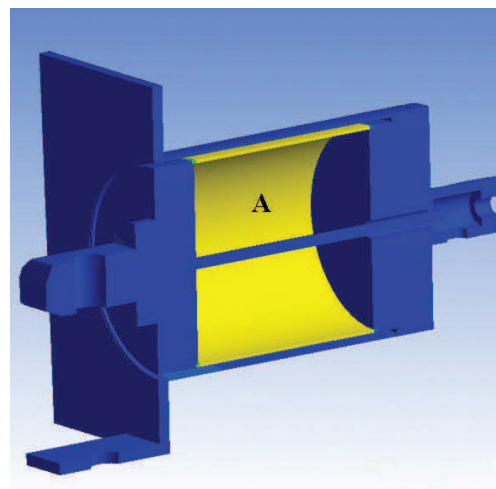


Рис. 5. Джоулево тепло коаксиального шунта

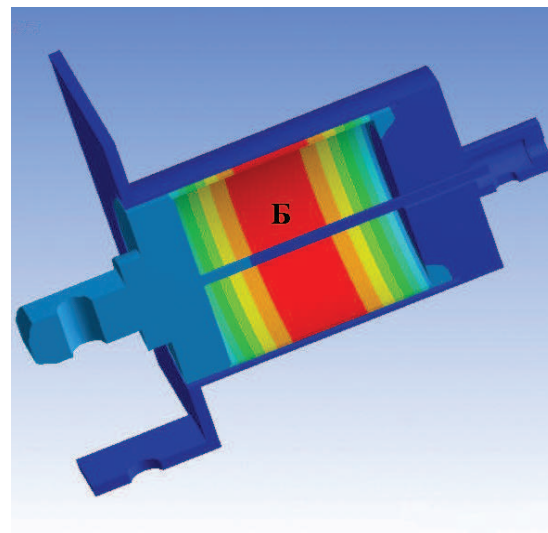


Рис. 6. Распределение температурного поля коаксиального шунта

Равномерно распределенное джоулево тепло передается в модуль Transient Thermal, в котором, как отмечалось выше, проводится определение температурного поля коаксиального шунта. Полученное трехмерное распределение температурного

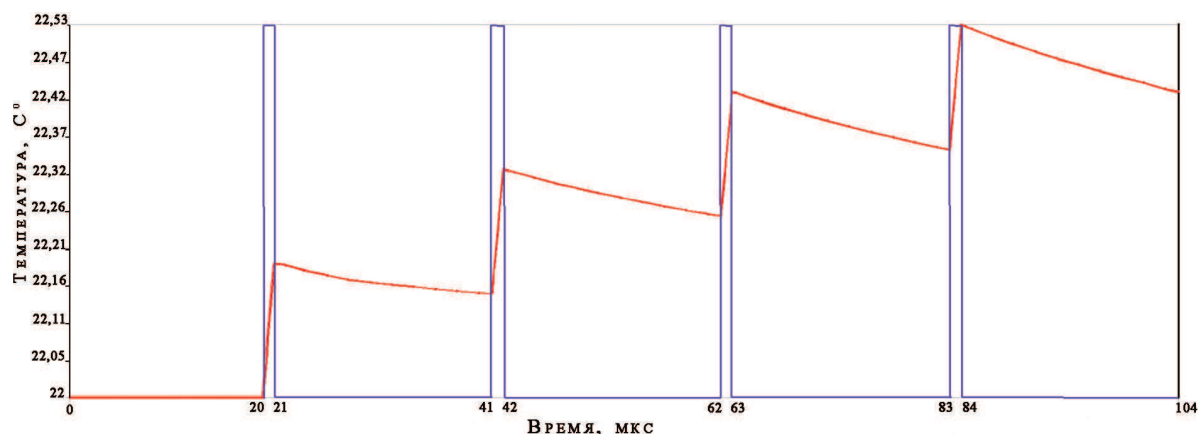


Рис. 7. Диаграмма изменения температуры при импульсном токе

поля коаксиального шунта представлено на рис. 6. Температура имеет максимальное значение в центре резистивной трубки в области Б на рис. 6. Минимальные температуры в основном сосредоточены на внешней медной трубке и торцах коаксиального шунта. Такое распределение температурного поля обусловлено естественной конвекцией и свойствами используемых материалов в коаксиальном шунте.

По описанной выше методике расчета были проведены исследования температурного поля коаксиального шунта при воздействии **импульсного тока длительностью 1 мкс** с периодом следования 21 мкс. В итоге получена зависимость изменения температуры от времени, представленная на рис. 7.

Если ток через шунт является **периодическим импульсным**, благоприятный режим для шунта, с точки зрения охлаждения, обеспечивается при периоде следования импульсов, равном времени охлаждения шунта до его первоначальной температуры. Если же шунт не успевает охладиться до первоначальной температуры, как в нашем случае, то для каждого следующего импульса начальной температурой является температура, до которой шунт охладится после окончания действия предыдущего импульса. Такой кумулятивный процесс происходит до тех пор, пока не наступит квазистационарное состояние температуры, когда повышение температуры за время действия импульса становится

равным температуре, полученной за период следования [7]. При периодическом импульсном сигнале с указанными выше параметрами квазистационарное состояние температуры не было получено из-за ограниченных возможностей используемого персонального компьютера.

#### Заключение

Результаты проведенного моделирования показывают, что при подаче постоянного или переменного электрического тока равномерное выделение теплоты приводит к неравномерному нагреву резистивного элемента коаксиального шунта. Максимальная температура нагрева имеет место в центре резистивной трубки и уменьшается к краям, а особенно к торцам. Это обусловлено наличием естественной конвекции и теплоемкости используемых материалов. Неравномерный нагрев резистивного элемента шунта нежелателен, т. к. неравномерность температурного поля вызывает внутренние механические напряжения в резистивном элементе при изменении значения тока в шунте, приводя к нелинейному характеру зависимости комплексного коэффициента преобразования шунта от температуры.

Таким образом, для снижения температуры перегрева резистивного элемента при постоянном или переменном токах следует использовать системы принудительного охлаждения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Muravyov S.V., Borikov V.N., Natalina N.M. A Computer System: Measurement of Welding Surge Current // Measurement and Control. – 2009. – V. 42 – № 2. – P. 44–47.
2. Бориков В.Н., Баранов П.Ф., Мамаев А.И. Программно-аппаратный комплекс для исследования микроплазменных процессов в растворах // Приборы. – 2011. – № 12. – С. 53–58.
3. Kawamura T., Haginomori E., Goda Y., Nakamoto T. Recent Developments on High Current Measurement Using Current Shunt // Transactions on electrical and electronic engineering. – 2007. – V. 2. – № 5. – P. 516–522.
4. Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
5. Буль К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютер-Пресс, 2002. – 223 с.
6. Залесский Л.М., Кукеков Г.А. Тепловые расчеты электрических аппаратов. – Л.: Энергия, 1967. – 379 с.
7. Бедарева Е.В. Исследование распределения температурного поля коаксиального шунта методом конечных элементов // Молодежь и современные информационные технологии: Труды IX Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2011. – С. 280–281.

Поступила 13.02.2013 г.