

УДК 621.317.727:537.612:004.42

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ КОАКСИАЛЬНОГО ШУНТА
В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ ANSYS WORKBENCH**

Л.И. Худоногова, Е.В. Бедарева

Томский политехнический университет

E-mail: likhud@tpu.ru

**Худоногова Людмила Иго-
ревна**, аспирант кафедры
компьютерных измеритель-
ных систем и метрологии Ин-
ститута кибернетики ТПУ.
E-mail: likhud@tpu.ru

Область научных интересов:
моделирование электромаг-
нитных устройств, информа-
ционно-измерительные ком-
плексы, системы дистанцион-
ных измерений, беспровод-
ные сенсорные сети.

**Бедарева Елена Вячесла-
вовна**, ассистент кафедры
компьютерных измеритель-
ных систем и метрологии Ин-
ститута кибернетики ТПУ.
E-mail: bedareva@tpu.ru

Область научных интересов:
программное обеспечение
измерительных систем, мате-
матическое моделирование
измерительных систем.

На динамические характеристики коаксиальных токовых преобразователей существенно влияет их собственная индуктивность. Целью исследования является моделирование магнитного поля и расчет индуктивности шунта. Проведено моделирование стационарного магнитного поля коаксиально шунта с использованием метода конечных элементов. Рассмотрены основные этапы построения 3D-модели магнитного поля шунта в программном пакете ANSYS Workbench. Данные исследования показали, что магнитное поле токового преобразователя сосредоточено в воздушном зазоре между цилиндрами. Исследуемая конструкция шунта позволяет уменьшить влияние паразитной индуктивности на его метрологические характеристики. По модели магнитного поля рассчитана собственная индуктивность коаксиального шунта с заданными параметрами. Полученное значение индуктивности коаксиального шунта составило 1,32 нГн, что отличается от теоретического (1,7 нГн) на 22 %.

Ключевые слова:

Коаксиальный шунт, магнитное поле, паразитная индуктивность, метод конечных элементов, ANSYS.

Введение

При испытаниях электроэнергетического оборудования, таких как мощные трансформаторы, защитные устройства, силовые размыкатели, коммутаторы, для осуществления мониторинга и диагностики цепей, обнаружения отказов электрооборудования, а также при контактной сварке и нанесении покрытий методом микродугового оксидирования применяют резистивные преобразователи тока – шунты. По сравнению с другими датчиками тока шунты обладают такими преимуществами, как простота и относительно низкая стоимость исполнения, высокая точность измерения, возможность измерять как переменный, так и постоянный токи.

Предпочтения отдают шунтам, которые для уменьшения собственной индуктивности выполнены по коаксиальному типу и обладают наиболее стабильными метрологическими характеристиками. На характеристики коаксиальных шунтов влияют свойства его магнитного поля [1, 2]. Для определения степени этого влияния необходимо знать не только распределение магнитной индукции по сечению проводящих элементов, но также обладать достоверными сведениями о величине собственной индуктивности шунта. Магнитное поле шунта может быть найдено как решение системы уравнений Максвелла. Получить аналитическое решение таких уравнений на практике оказывается затруднительно, особенно в случае трехмерной задачи.

Для решения трехмерных задач могут быть использованы различные математические методы. В частности, применение метода конечных элементов (МКЭ) позволяет с высокой точностью аппроксимировать сложную геометрию при ограниченном числе расчетных узлов. Расчет с помощью МКЭ реализован в программном пакете ANSYS, предназначенном для решения электромагнитных, магнитостатических, механических и других видов задач. Целью данной

работы является моделирование стационарного магнитного поля коаксиального шунта в программе ANSYS Workbench и нахождение собственной индуктивности шунта.

Моделирование магнитного поля шунта

Коаксиальный шунт представляет собой измерительный преобразователь тока, конструктивно состоящий из двух вложенных друг в друга цилиндров, по которым ток протекает в противоположных направлениях (рис. 1). Внутренний цилиндр изготавливают из резистивного материала с большим удельным сопротивлением, например манганина. Внешний цилиндр, сделанный из меди, имеет меньшее удельное сопротивление. Первый токовый вывод закреплен на внутреннем цилиндре, второй вывод – на внешнем, при этом выступая за границы цилиндра. Цилиндры электрически соединены между собой посредством токопроводящей заглушки. Потенциальный вывод расположен во внутренней полости внутреннего (резистивного) цилиндра. Благодаря коаксиальной конструкции и расположения потенциального провода шунт характеризуется малым значением собственной индуктивности.

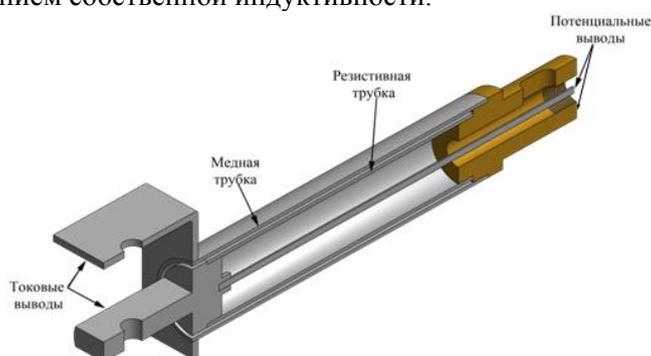


Рис. 1. Конструкция коаксиального шунта

Моделирование магнитного поля проводится для коаксиального шунта со следующими параметрами: толщина резистивного цилиндра – 1 мм; длина – 90 мм; внутренний радиус – 9 мм; сопротивление шунта – 750 мкОм; номинальный ток – 1 кА, воздушный зазор между цилиндрами – 1 мм [3].

Моделирование магнитного поля коаксиального шунта в программном пакете ANSYS Workbench состоит из следующих этапов:

1. Выбор типа расчета задачи.
2. Построение геометрии.
3. Задание физических свойств материалов, из которых изготовлен шунт.
4. Генерация сетки конечных элементов.
5. Определение граничных условий и нагрузок.
6. Расчет задачи и визуализация результатов.

Для построения модели используется тип расчета Magnetostatic. Данный модуль позволяет провести объемный анализ статического магнитного поля шунта, по которому протекает постоянный ток амплитудой 1 кА.

В ANSYS Workbench существует два способа создания геометрической модели объекта исследований: построение геометрии непосредственно в программе ANSYS с помощью модуля DesignModeler или импорт готовой геометрии из CAD-программы. Поскольку шунт обладает достаточно сложной конструкцией, которая требует высокой точности передачи геометрических размеров, оптимальным решением является построение геометрии в одной из CAD-программ. Геометрия шунта создается в программе Inventor 2011, после чего импортируется в ANSYS Workbench. ANSYS Workbench позволяет добавлять к импортированной геометрии линии, поверхности и объемы, используя модуль DesignModeler. Следует подчеркнуть, что, несмотря на заявленное многообразие форматов файлов, которые могут быть импортированы в ANSYS, при импорте модели зачастую возникают сложности, поэтому выбору формата модели было уделено особое внимание. Поскольку геометрическая модель шунта состоит только из

твердотельных объектов (Body, Solid), она может быть сохранена в формате с расширением *.sat. Данный формат используется для файлов, записанных при помощи стандарта ACIS, и импортируется в ANSYS Workbench без ошибок.

Материалы и их характеристики определяются в модуле Engineering Data. В модели используется четыре материала: медь, марганец, латунь и воздух. ANSYS Workbench располагает базой данных различных материалов и их свойств, которая может быть дополнена и модифицирована пользователем. Если необходимый материал отсутствует в базе, он может быть добавлен вручную, с заданием его основных характеристик. Так, для марганца, меди и латуни задаются значения таких параметров, как удельное сопротивление и магнитная проницаемость.

Следующим шагом является генерация сетки конечных элементов. Сетка генерируется на геометрической модели и является основой для составления и решения системы уравнений в матричном виде. Этот этап, по сути, определяет точность и скорость решения задачи. Чем больше элементов в сетке, тем более точным будет решение, но тем больше времени займет процесс расчета. В нашем случае для получения приемлемого решения генерируется сетка со следующими параметрами: число элементов – 63 598, число расчетных узлов – 103 303, форма элементов – параллелепипеды и тетраэдры. При генерации использовался режим адаптивного формирования сетки – выполнялся автоматический подбор размера конечного элемента в зависимости от формы и кривизны поверхности. Построенная сетка конечных элементов для коаксиального шунта приведена на рис. 2.

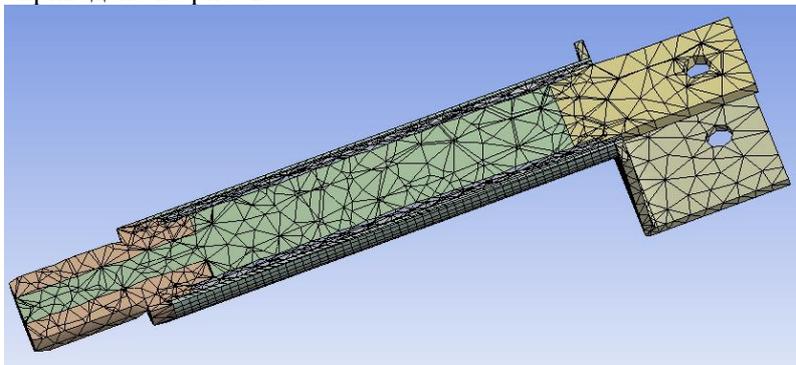


Рис. 2. Конечно-элементная сетка коаксиального шунта

Определение граничных условий и нагрузок является важнейшим этапом при расчете магнитного поля коаксиального шунта. Несмотря на то что решатель ANSYS отличается очень высокой устойчивостью, неправильно заданные граничные условия могут привести к некорректным результатам и «падению» решения.

Для задания граничных условий первоначально, на этапе создания геометрии шунта, необходимо ограничить расчетную область воздухом. Это операция осуществляется в модуле DesignModeler с помощью команды Enclosure в меню Tools. Модуль Magnetostatic предлагает два типа граничных условий – Magnetic Flux Parallel и Magnetic Flux Normal (по умолчанию). К поверхности ограничивающей сферы прикладываются граничные условия Magnetic Flux Parallel, при которых магнитные силовые линии параллельны границе (рис. 3). Такие граничные условия обычно прикладывают к внешним поверхностям воздушного тела, чтобы сконцентрировать магнитный поток внутри расчетной области.

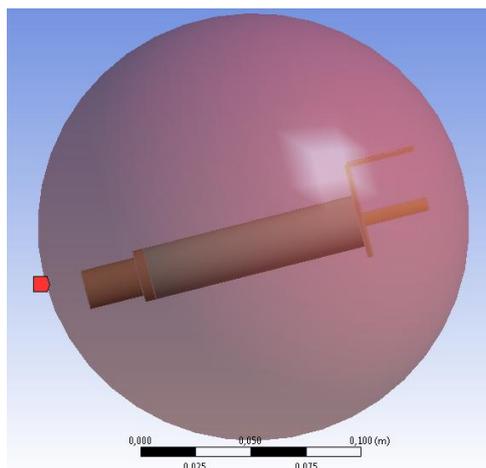


Рис. 3. Граничные условия Magnetic Flux Parallel на внешних границах воздушной сферы

При задании нагрузки – тока номинальным значением 1 кА – необходимо прежде всего учитывать траекторию протекания тока. Ток прикладывается к токовому выводу, протекает по внутренней резистивной трубке и через заглушку переходит на внешний цилиндр. Таким образом, ток проходит по трубкам в противоположных направлениях.

Для организации такой траектории на один из токовых выводов подается ток значением 1 кА, а на другой – ток такой же амплитуды, но со знаком «минус». На противоположном конце шунта задается нулевой потенциал. На рис. 4 показаны все нагрузки, приложенные для построения модели магнитного поля коаксиального шунта.

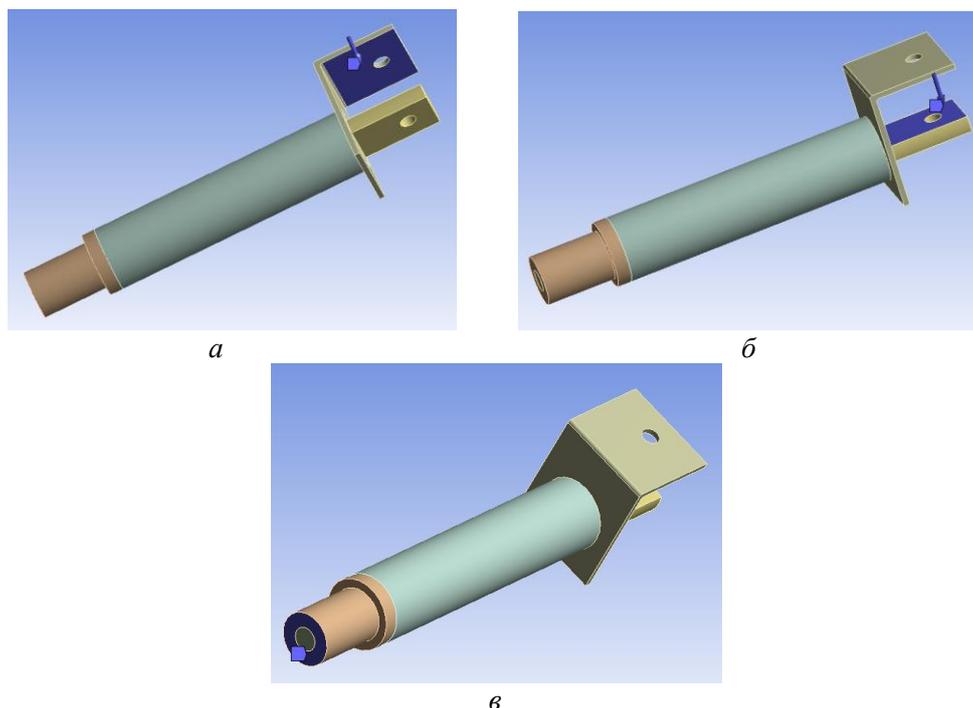


Рис. 4. Приложение нагрузок: а) ток значением 1 кА; б) ток значением –1 кА; в) напряжение 0 В

Для расчета задачи необходимо предварительно указать величины, подлежащие определению. Модуль Magnetostatic предоставляет возможность нахождения магнитной индукции, напряженности магнитного поля, электромагнитных сил, плотности тока. Для моделирования магнитного поля коаксиального шунта в качестве рассматриваемой величины выбирается магнитная индукция. Расчеты можно проводить как для всей области, так и для конкретных ее элементов либо отдельно взятых точек. Кроме того, с помощью функции Probe существует

возможность задать конкретную точку, в которой необходимо узнать значение той или иной величины. Данная функция использовалась, в частности, для нахождения значения магнитной индукции в воздушном зазоре.

После проведения расчета осуществляется просмотр результатов (вкладка Solution). Распределение магнитной индукции отражается с помощью контурных зон (Contour Bands). Численную информацию о величине рассматриваемого параметра можно получить из легенды, отражающейся в окне проекта. Полученное распределение стационарного магнитного поля коаксиального шунта представлено на рис. 5. Для того чтобы исследовать поле внутри шунта, было сделано два разреза.

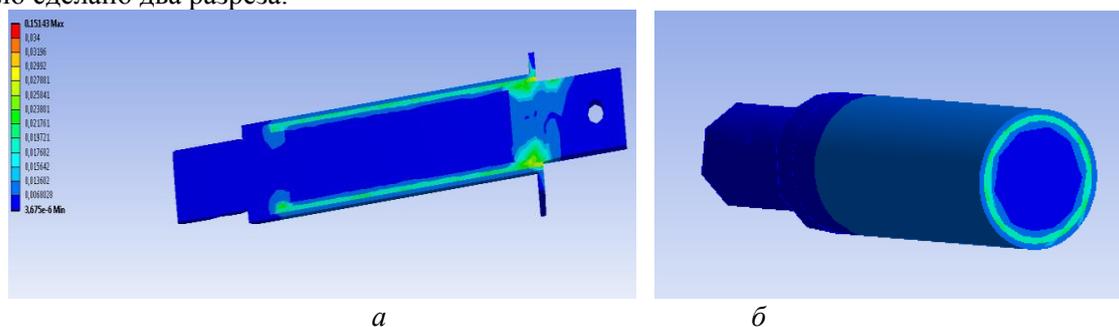


Рис. 5. Распределение магнитного поля коаксиального шунта: *а)* продольный разрез; *б)* поперечный разрез

Таким образом, магнитное поле шунта практически полностью сконцентрировано в воздушном зазоре между двумя цилиндрами. Внутри внешнего цилиндра и снаружи магнитное поле практически отсутствует. Благодаря коаксиальной конструкции шунта паразитная индуктивность, возникающая за счет магнитного поля, не будет оказывать существенного влияния на значение выходного напряжения шунта, таким образом сводя к минимуму возникающую погрешность.

Экспериментально полученное значение магнитной индукции в воздушном зазоре на расстоянии 10 мм от центра для модели, построенной в программе ANSYS, составляет 0,02 Т.

Магнитная индукция B для коаксиальной конструкции, состоящей из двух проводящих цилиндров, рассчитывается следующим образом:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r},$$

где μ – магнитная постоянная, Гн/м; I – ток, протекающий по шунту, А; r – радиус, на котором рассчитывается значение магнитной индукции, м.

В воздушном зазоре на радиусе $r = 10$ мм магнитная индукция составляет

$$B = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot 0,01} = 0,02 \text{ Т.}$$

Экспериментальное и расчетное значение магнитной индукции совпадают. Погрешность составляет 0,85 %. Это значение погрешности допустимо, что позволяет сделать вывод о правильности полученных данных. С использованием полученного значения магнитной индукции становится возможным определение реальной паразитной индуктивности шунта.

Индуктивность коаксиального шунта L вычисляется по формуле

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \ln \frac{b+a}{b},$$

где a – зазор между цилиндрами, м; b – внешний радиус резистивной трубки, м; l – длина резистивной трубки, м [4, 5].

Для шунта с выбранными параметрами теоретическое значение индуктивности составляет 1,7 нГн.

Связь между индуктивностью L и магнитной индукцией B , которая является, в свою очередь, функцией расстояния r , описывается формулой

$$L = \frac{1}{I^2} \int \frac{B^2}{\mu_0} 2\pi r dr. \quad (1)$$

Таким образом, для нахождения собственной индуктивности шунта следующим шагом является построение графика распределения магнитной индукции по сечению шунта (зависимости магнитной индукции от расстояния, на котором она высчитывается). Кривая распределения магнитной индукции показана на рис. 6.

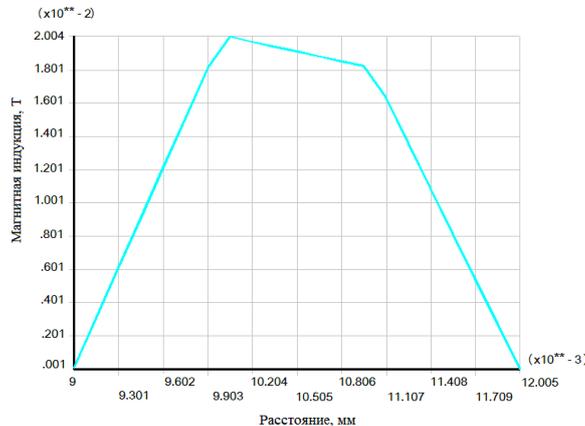


Рис. 6. Кривая распределения магнитной индукции по сечению коаксиального шунта

Чтобы воспользоваться формулой (1), определим зависимость $B(r)$ по полученному графику. Из графика видно, что $B(r)$ может быть представлена суммой функций $B_i(r)$, где $i = 1, 2, 3$. Тогда выражение (1) примет следующий вид:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\int_{0.009}^{0.010052} (B_1^2 r) dr + \int_{0.010052}^{0.010953} (B_2^2 r) dr + \int_{0.010953}^{0.012005} (B_3^2 r) dr \right).$$

Рассчитав данное выражение, получаем значение индуктивности 1,32 нГн. Отличие этого значения от расчетного составляет 22 %.

Заключение

Результаты проведенного моделирования показывают, что магнитное поле коаксиального шунта практически полностью сосредоточено в воздушном зазоре между цилиндрами. Внутри и снаружи цилиндров поле, создаваемое протекающим током, отсутствует, что позволяет уменьшить вклад, вносимый в суммарную погрешность паразитной индуктивностью шунта. Значение магнитной индукции в зазоре, полученное при моделировании, составляет 0,02 Т, что соответствует расчетному значению. Построенная модель магнитного поля позволила определить значение паразитной индуктивности коаксиального шунта. По данным моделирования собственная индуктивность шунта составляет 1,32 нГн. Отличие от теоретически рассчитанного значения индуктивности составляет порядка 22 %. Использование модели магнитного поля шунта позволяет снизить трудоемкость и материальные затраты, связанные с необходимостью проведения натурного эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kawamura T., Haginomori E., Nakamoto T., Goda Y. Recent Developments on High Current Measurement Using Current Shunt // Transactions on electrical and electronic engineering. – 2007. – V. 2. – № 5. – P. 516-522.
2. Векслер М.С., Теплинский А.М. Шунты переменного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.
3. Bedareva E.V., Cimbalist Je.I., Murav'ev S.V., Varanov P.F. Влияние способов подключения потенциальных выводов на динамические характеристики коаксиальных шунтов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 4: Энергетика. – С. 154.

4. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., стереотип. – М.: Высш. шк., 1991. – 288 с.
5. Kraus J.D., Carver K.R. Electromagnetics. – 2nd edition. – New York, McGraw-Hill, 1953. – 389 p.

Поступила 12.05.2014 г.