

Использование пакета ANSYS

для моделирования электромагнитных элементов импульсных преобразователей

Статья продолжает тему, начатую в первом выпуске тематического приложения «Силовая Электроника» материалом «Устройства заряда на базе одноконтурных комбинированных преобразователей» [4], и касается моделирования электромагнитных элементов преобразователей. В качестве объекта взят трансформатор комбинированного преобразователя, о котором шла речь в упомянутой статье.

Константин Матвеев

mkf@ie.tusur.ru

Общепринятый подход к моделированию трансформаторов и дросселей основан на использовании известных пакетов моделирования электронных схем (Pspice, OrCAD, Workbench и пр.). Модели трансформаторов позволяют задать геометрию сердечника, ширину воздушного зазора, параметры материала, определяющие петлю гистерезиса. Таким образом, легко можно моделировать электронные схемы, содержащие трансформаторы и дроссели. В случае одно- и двухобмоточных элементов особых проблем не возникает, так как считается, что эти обмотки равноправны между собой, то есть имеют равный коэффициент связи с сердечником. Если же трансформатор имеет большее количество обмоток, то в некоторых случаях уже нельзя пренебрегать их взаимным расположением на сердечнике. Для прямоходовых и обратноходовых схем преобразователей, имеющих несколько выходных напряжений с обратной связью только по одному из них, создание модели уже представляет собой сложную задачу. Связано это с тем, что обмотки, расположенные на стержне сердечника последовательно, имеют различные индуктивности рассеяния. В общем случае схема замещения трансформатора может быть представлена как схема с распределенными параметрами. Ясно, что определить параметры такой схемы замещения очень сложно, поэтому используют в основном упрощенные схемы замещения, достаточно адекватно отражающие магнитные потоки между обмотками [1]. Однако несмотря на упрощенность схемы, определить ее параметры возможно только на основе измерения параметров реального трансформатора заданной геометрии. То есть для моделирования схемы требуется как минимум ее изготовление. Кроме того, имея в руках реальный трансформатор, опять же не так просто определить параметры схемы замещения. Так как, например, для четырехобмоточного трансформатора количество ветвей упрощенной схемы замещения может быть равно семи и более. Определить непосредственно параметры схемы замещения не так просто. Как правило, в этом случае прибегают к вычислениям на основе результатов прямых измерений. В этом

кроется основной источник погрешностей — из-за разностей близких величин могут возникать существенные ошибки. В статье [2] дана схема замещения многообмоточного трансформатора и предложена методика определения параметров схемы только прямыми измерениями. Но, как отмечалось ранее, это не избавляет от отмеченного выше недостатка — необходимо создание модели трансформатора «в железе». В том случае, если индуктивность рассеяния является таким же критичным параметром, как и коэффициент трансформации (резонансные и квазирезонансные схемы), то, возможно, придется создать не один трансформатор.

Существенно упрощает процесс разработки трансформатора с нестандартной геометрией его моделирование методом конечных элементов [3]. Суть этого метода в том, что объемная модель объекта предварительно разбивается на отдельные элементы и затем для всех этих элементов решается система уравнений, описывающая соответствующее физическое взаимодействие. Не вдаваясь в подробности, можно сказать, что методом конечных элементов решаются очень многие задачи, связанные с полями, будь то электрические, магнитные, тепловые или механические. Численный расчет позволяет найти решения, которые невозможно получить аналитически. Как правило, это связано со сложной трехмерной геометрией объекта.

Пакеты программ конечно-элементного моделирования широко применяются при проектировании механических конструкций, а также газовой и гидродинамическом анализе, позволяя экономить значительное время и средства на испытаниях готовых конструкций. Что касается электроники, то численный расчет электромагнитных элементов редко используется отчасти из-за отсутствия необходимости в точном расчете паразитных параметров, а отчасти — из-за распространенности стандартных электромагнитных элементов, для которых основные соотношения получены экспериментально и аналитически.

Примерами объектов, где моделирование дает существенное преимущество, являются индуктор ин-

дукционного нагревателя, мощный высокочастотный трансформатор, трансформатор или дроссель нестандартной конструкции, а также многие другие электромагнитные элементы. Причем чем сложнее и дороже конструкция, тем больший выигрыш можно получить.

Из наиболее распространенных пакетов конечно-элементного моделирования можно отметить пакет ANSYS, который обладает широчайшими возможностями, охватывающими практически все возможные задачи. В частности, что касается электричества, то этот пакет позволяет моделировать электрические поля (статические, гармонические, с произвольным законом изменения), магнитные поля, высокочастотные электромагнитные поля, участки электрических цепей с сосредоточенными параметрами.

Пакет ANSYS использовался при расчете, анализе режимов работы трансформатора одноконтурного комбинированного преобразователя [4]. Особенность этого трансформатора в том, что первичная и вторичная обмотки выполнены на разных стержнях П-образного сердечника. Этим достигается необходимая индуктивность рассеяния между этими обмотками. Аналогичная задача встречается при расчете сварочных трансформаторов, однако точность, с которой этот расчет производится, оставляет желать лучшего. Использование пакета ANSYS позволило рассчитать значение индуктивности, а также определить неравномерность намагничивания стержней трансформатора.

Создание численной модели трансформатора начинается с разработки его трехмерного изображения. Необходимо стремиться к тому, чтобы упростить изображение. Очень часто трехмерный объект представляет собой осесимметричную конструкцию (тороид, чашка), либо он симметричен относительно некоторых плоскостей (Ш-образный или П-образный сердечник). В данном случае трансформатор выполнялся на сердечнике типа ПК, причем на разных стержнях располагаются разные обмотки, поэтому модель имеет симметрию только относительно одной плоскости (рис. 1).

Так как существенную роль в работе трансформатора играют только сердечник

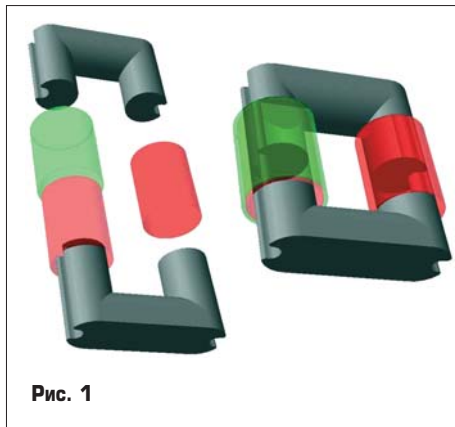


Рис. 1

и обмотки, то, естественно, нет необходимости в каких-либо каркасах и пр.

После того как выбрана плоскость (ось) симметрии (если она есть), необходимо создать сердечник (при наличии симметрии создается соответствующая часть) в редакторе ANSYS либо в любой другой программе объемного конструирования (AutoCAD, «Компас», SolidWorks и др.) (рис. 2).

Затем создается область окружающего пространства (воздух), в котором будет находиться сердечник. Эта область будет ограничивать расчет индукции и напряженности поля. Величину этой области нужно выбирать исходя из предполагаемого рассеяния поля. Если рассеяние невелико, то и область может быть небольшой.

Следующим этапом создаются описания материалов, используемых в конструкции. Выбор характеристик очень и очень широк. Можно задавать только магнитную проницаемость, а можно кривую намагничивания, коэрцитивную силу, объемное сопротивление и пр. Для шихтованных сердечников можно задать характеристики по каждой координате, тем самым учесть ориентацию в пространстве пластин сердечника. Естественно, если нет особой необходимости, то не стоит все усложнять. Например, задание кривой намагничивания вместо магнитной проницаемости увеличивает время анализа в несколько раз.

Разбиение объекта на элементы можно проводить вручную, а можно воспользоваться средствами пакета ANSYS. Программа сама

в зависимости от геометрии выберет размеры элементов. При необходимости полученную сетку можно изменять в интерактивном режиме для более точного расчета в необходимых областях. Тип элемента выбирается пользователем самостоятельно в зависимости от геометрии. Подробно с различными типами элементов можно познакомиться в технической документации ANSYS [5, 6]. На рис. 3 изображен сердечник (точнее его половина) и окружающее пространство с уже наложенной сеткой элементов. Номерами 1 и 2 обозначены материалы — воздух и феррит.

Обмотки с током могут быть заданы элементами только одного типа SOURC36. Для простейшей геометрии (катушка на круглом сердечнике, прямая шина, дуга) требуется только один элемент. Для создания катушек на прямоугольном сердечнике существует макрокоманда RACE.

Далее запускается расчет, при этом указывается, каким методом он будет производиться. Существуют три метода:

Reduced Scalar Potential (RSP) — применяется, если модель не содержит магнитных материалов или если отсутствуют источники тока (для моделей, содержащих одновременно и магнитные материалы, и источники тока, этот метод применять нельзя).

Difference Scalar Potential (DSP) — применяется для расчета моделей, содержащих магнитные материалы и источники тока, при условии, что нет замкнутых частей магнитопровода.

Generalized Scalar Potential (GSP) — применяется для тех моделей, где имеются замкнутые части магнитопровода (без воздушного зазора).

Результаты расчета магнитного поля могут быть представлены графически, отдельно для магнитной индукции (рис. 4) и для напряженности поля (рис. 5). Эти величины могут быть отображены как в скалярном виде, так и в векторном. Составляющие этих величин могут быть отображены отдельно по каждой из координат. Для двумерных изображений строятся также силовые линии магнитного поля.

На основе анализа магнитного поля в трансформаторе комбинированного преобразователя определено, что максимальная

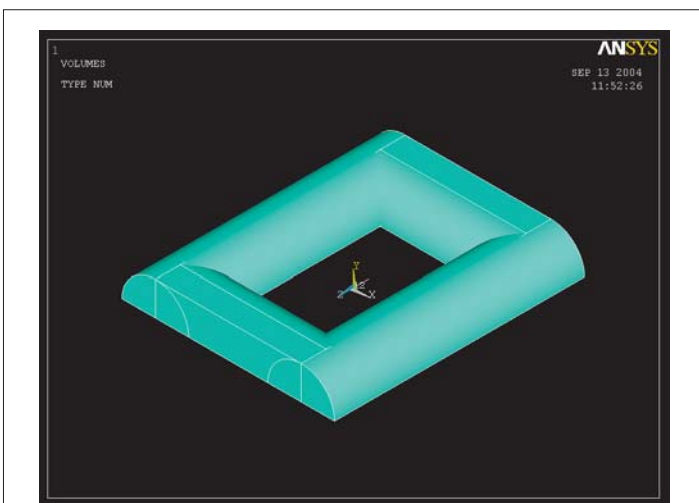


Рис. 2

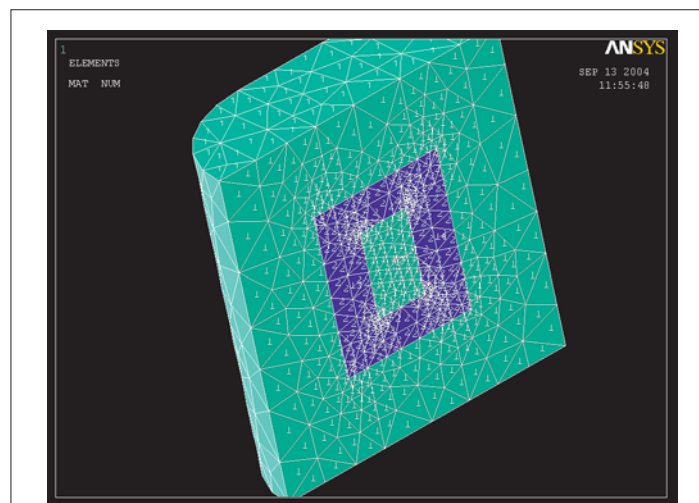


Рис. 3

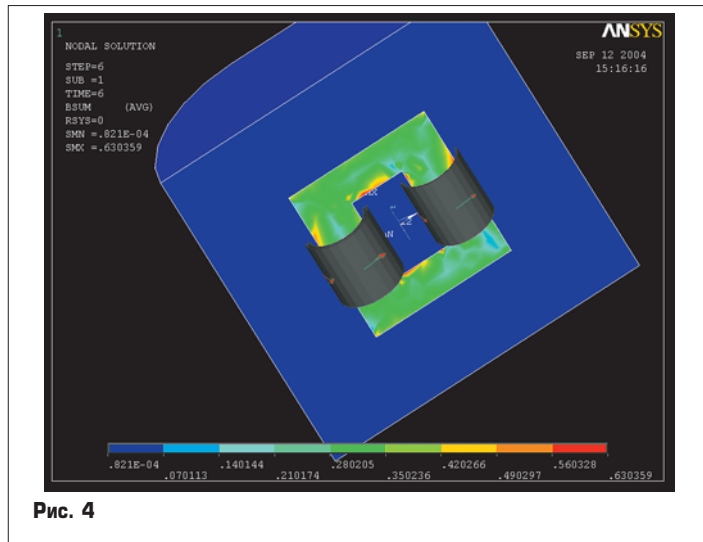


Рис. 4

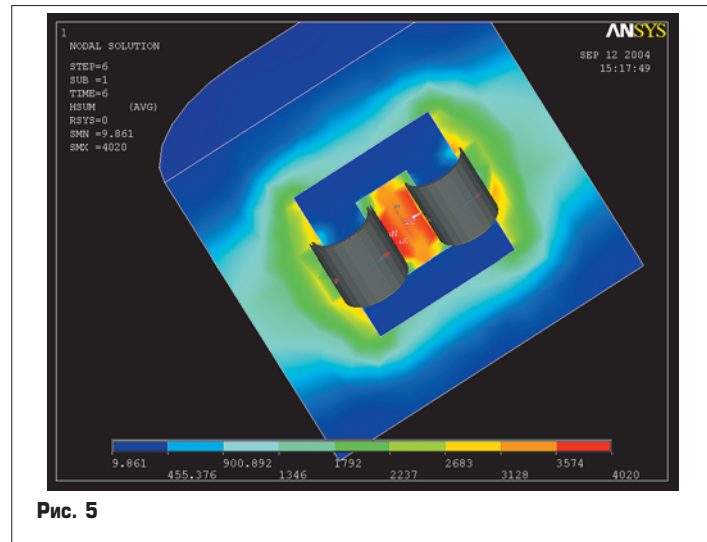


Рис. 5

индукция в стержне с первичной обмоткой превышает индукцию в стержне со вторичной обмоткой в два раза. А размах индукции в обоих стержнях одинаков. Такой режим сохраняется до тех пор, пока феррит (в данном случае использовался M2500HMC) не имеет возможности насыщаться. В режиме работы преобразователя, когда трансформатор близок к насыщению, максимальная индукция в обоих стержнях выравнивается, а размах сохраняется. Такой режим при максимальных токах в обмотках показан на рис. 4 и 5. Исходя из этого, была разработана схема размещения трансформатора комбинированного преобразователя (рис. 6), которая применялась для анализа в системе проектирования OrCAD. Особенность ее в том, что ин-

дуктивность намагничивания для каждого из стержней представлена отдельно.

На основе результатов, полученных на модели, определялись потери мощности в трансформаторе и рассчитывались режимы максимальных электромагнитных нагрузок. Номинальный режим работы преобразователя демонстрируют диаграммы на рис. 7, где показан выходной зарядный ток аккумулятора $I(V1)$ и токи, отражающие напряженность поля в стержнях магнитопровода $I(L6)$, $I(L7)$.

Сравнение модели с реальным объектом позволяет говорить о высокой точности вычислений. Так, например, расчетная величина индуктивности рассеяния обмоток, расположенных на разных стержнях сердечника,

отличалась от реально измеренной менее чем на 5%. Величину индукции в стержнях магнитопровода не представлялось возможным измерять во время работы преобразователя, но достаточно просто было вычислить на модели. Одинаковое поведение модели и объекта в максимальных режимах позволяет судить об адекватности полученной модели.

Заключение

Следует отметить, что моделирование трансформаторов — не единственная область применения пакета ANSYS. Очень эффективно моделировать объекты, в которых необходимо достичь определенного распределения магнитного поля за счет изменения геометрии. Примером может служить индукционный нагреватель для деталей сложной формы. При этом возможно решение связанной задачи (электромагнитный и тепловой расчет). Расчет распределения электрического тока на низкой и высокой частоте позволяет оптимизировать токоведущие шины (обмотки трансформатора). Преимущество не только в экономии времени и средств на изготовление действующего объекта, но и в том, что численная модель позволяет определить практически все необходимые параметры, что на реальном объекте сделать бывает просто физически невозможно.

Литература

1. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия. 1981.
2. R. W. Erickson, D. Maksimovic. A multiple-winding magnetics model having directly measurable parameters // IEEE Power Electronics Specialists Conference. 1998.
3. Сильвестр П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. М.: Мир. 1986.
4. Скворцов В. А., Русанов В. В., Матвеев К. Ф. Устройства заряда на базе однотактных комбинированных преобразователей // Компоненты и технологии: Силовая электроника. 2004. № 1.
5. ANSYS Documentation.
6. ANSYS Theory.

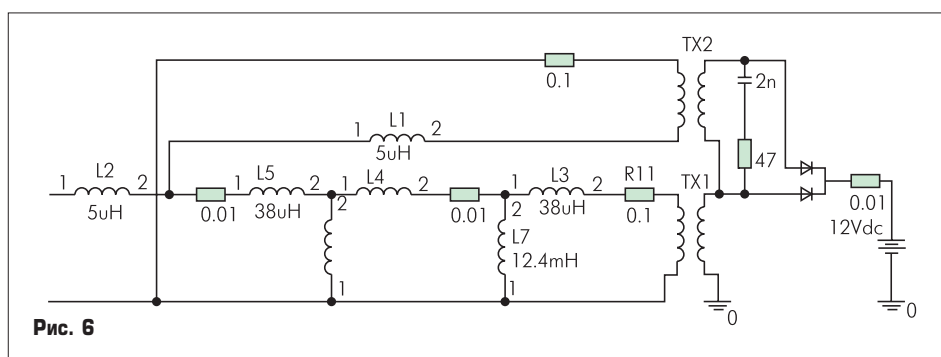


Рис. 6

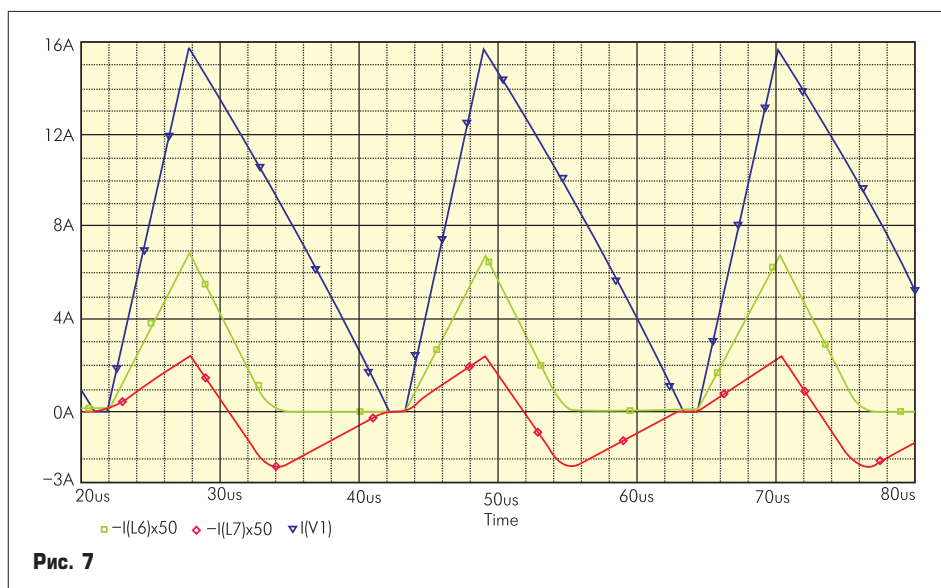


Рис. 7