

Федеральное агентство по образованию

ГОУ ВПО «Уральский государственный
технический университет – УПИ»

*Посвящается 85-летию
Уральского государственного
технического университета – УПИ
и механико-машиностроительного
факультета*

Вестник УГТУ – УПИ № 11 (63)

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ

Сборник трудов II Российской межвузовской конференции
по компьютерному инженерному анализу

Екатеринбург
2005

Е.В. Живоглядов, И.В. Черных

*Екатеринбург, Уральский государственный
технический университет – УПИ*

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ «ELCUT»

Электропривод потребляет основную долю производимой в мире электроэнергии. Правильное решение основных проблем развития электропривода имеет важное значение для экономики страны. Каждое новшество должно повысить эффективность действия оборудования. Необходимость именно такого подхода была давно ясна ведущим ученым-разработчикам новых видов оборудования.

Доливо-Добровольский М.О. и Видмар М. призывали «минимизировать не стоимость трансформатора, а стоимость трансформации». Электромашиностроители проводят субоптимизацию своей продукции: снижают металлоемкость, уменьшают габаритные размеры, снижают стоимость электрических машин – в основном за счет повышения частоты их вращения. Действительно, высокоскоростные машины имеют существенно лучшие массогабаритные показатели. Так, двигатели для привода рольгангов, которые в своей основной массе применяются на предприятиях по выпуску прокатных изделий, мощностью в 1 кВт при частоте вращения 200 об/мин. всего лишь в 2,6 раза легче двигателя мощностью 160 кВт при 2955 об/мин. Но механизмы, для которых создается электропривод, чаще требуют более низких частот вращения или скоростей перемещения [3].

Традиционным решением, применяемым для обеспечения низких частот вращения рабочих механизмов, является высокоскоростной двигатель с редуктором. Системный подход, анализ с позиции наибольшей эффективности показывает, что суммарная масса, габаритные размеры и стоимость при указанном традиционном решении двигателя и редуктора в достаточно большом классе применений весьма существенно отличаются от соответствующих параметров самих двигателей. Рассмотрение главной альтернативы – безредукторных электроприводов (т. е. электродвигателей, непосредственно связанных с рабочим механизмом), представляет, таким образом, постоянный интерес для специалистов электромехаников ввиду того, что они позволяют кардинально изменить структуру кинематических передач электроприводов путем непосредственной передачи электромагнитного воздействия в рабочий орган. При этом открываются новые возможности по формированию различных режимов работы электромеханической или электротехнологической системы. Например [1], для тягового привода снимаются ограничения по ускорениям и углам наклона пути; для ядерных реакторов подводных лодок и атомных электростанций имеется возможность, не нарушая герметически замкнутой системы трубопроводов, перекачивать жидкометаллическое рабочее тело.

Задача создания безредукторного электродвигателя может быть решена при сохранении принципа «движения приводящего и приводимого элемента в одной и

той же координате» – движения используемого и получившего значительное развитие в последнее время в линейных и дуговых двигателях.

В различных информационных материалах [2] сообщалось об успешном применении ЛАД в приводах конвейеров, поворотных столов, раздвижных дверей, кабельных токоподводов (плавное растягивание петель кабеля движущегося крана), стрелочных переводов, порталных кранов, транспортных устройств робототехнических комплексов, в цеховой установке транспортировки деталей с использованием воздушной подушки, в испытательных стендах для разрушающих испытаний автомобилей, в приводах тележек испытательного бассейна (исследование моделей судов), в рудничном транспорте, в натяжных устройствах, в плунжерных насосах, в приводе ткацких станков, плосковязальных, металлоткацких машин, в транспортировке рельс, труб, деталей конструкций и т. п.

В зависимости от области применения линейные двигатели можно разбить на три группы [2]:

1) для получения механической силы («силовые машины») – это двигатели, в которых определяющим является пусковое и удерживающее усилие; их ход бывает коротким или равным нулю, скорость движения низкой, действие кратковременным, энергетические характеристики менее существенны (КПД равен нулю при работе на упор), чем удельные силовые показатели, т. е. сила, отнесенная к мощности, к массе или к активной поверхности индуктора;

2) для получения механической энергии, т. е. для получения на ограниченном пути максимально возможной энергии («электропульты», разгон автомобилей при их разрушающих испытаниях, движение моделей судов и т. п.). Как правило, кроме линейных двигателей никакими другими приемлемыми средствами аналогичных результатов достигнуть нельзя;

3) для получения механической мощности – это двигатели транспортных систем и работающих непрерывно или с высокими продолжительностями включения промышленных приводов. Для этих двигателей среди прочих существенную роль играют энергетические характеристики (в частности, энергетический фактор – произведение КПД и $\cos \varphi$).

Среди низкоскоростных ЛАД, которые могли бы обеспечить характеристики соответствующие третьей группе, а в основном именно такие характеристики необходимы для электродвигателей металлургического производства, цилиндрические имеют наиболее высокие технико-экономические показатели. Принципиальной конструктивной особенностью цилиндрических ЛАД является то, что вторичный элемент заключен внутри первичной части.

Главные достоинства цилиндрических ЛАД: отсутствие лобовых частей и потерь в них, отсутствие поперечного краевого эффекта, геометрическая и электромагнитная симметрия. Последнее обстоятельство позволяет сделать воздушный зазор минимально возможным: его выбирают главным образом из механических соображений. Только при нарушении геометрической симметрии возникает эксцентриситет вторичного элемента и, как следствие, одностороннее магнитное тяжение.

В настоящее время для исследования режимов работы линейной электрической машины, на стадии проектирования, применяются математические модели, отличающиеся разным уровнем допущений и сложности вычислений. Можно выделить два типа численных моделей, достаточно корректно учитывающих влияние продольного краевого эффекта [2]:

- двух- и трехмерные модели с расчетом магнитного поля методами конечных разностей или конечных элементов (численные методы расчета);
- модели, основанные на детализированных магнитных схемах замещения.

В первом случае, при известных граничных и начальных условиях чаще всего решается дифференциальное уравнение в частных производных для векторного магнитного потенциала в заданной области типа

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + J_{ct} - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

Иногда дифференциальное уравнение записывается относительно других величин – потоков в участках, индукций и др. В общем случае задача является нелинейной и решается с использованием последовательных приближений, поскольку магнитная проницаемость μ зависит от магнитной индукции, различной в различных точках области [2].

В [10] показано применение конечно-разностного метода сеток для расчета магнитного поля и характеристик ЛАД с двусторонним индуктором и сплошным немагнитным вторичным элементом при заданной системе первичных токов. При этом производные в (1) аппроксимируются конечными разностями, а область немагнитного зазора и краевых зон в полученной сетке имеет несколько сотен узлов. Используется релаксационный метод решения системы уравнений, описывающих сетку [2].

Широко применяется расчет магнитного поля в ЛАД с помощью метода конечных элементов, когда решение дифференциального уравнения сводится к отысканию максимума функционала [2]

$$F = \iint_G \left[\frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right\} - \left(J - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} \right) \right] dx dy \text{ по } A. \quad (2)$$

При этом исследуемая область разделяется на треугольные элементы, внутри каждого неизвестная функция однозначно определяется через ее значения в вершинах треугольника. В результате задача сводится к решению для каждого момента времени системы алгебраических уравнений относительно значений A в узловых точках разбиения. При этом не накладываются ограничения на конфигурацию исследуемой области и свойства среды. Точность получаемых результатов зависит лишь от вида и подробности разбиения области на элементы [2].

При всех положительных качествах и практически не ограниченных возможностях численных методов расчета ЛАД следует отметить, что они требуют значительных вычислительных ресурсов, особенно при анализе многополюсных

насыщенных электрических машин, работающих в неустановившихся режимах при питании от источников несинусоидального напряжения с нелинейными полупроводниковыми элементами. Вместе с тем они дают подчас излишне подробную картину потокораспределения, поскольку, в конце концов, требуется найти такие интегральные параметры электрической машины, как потокосцепления, ЭДС, мощности и полное тяговое усилие [2].

С учетом этого в ряде случаев более рационально использовать методы расчета, которые предполагают сведение реального устройства к электрической цепи. Параметры цепи интегрально представляют свойства отдельных участков машины и определяются из решения задачи поля для каждого из этих участков при упрощенных граничных условиях. Магнитное поле в участке рассчитывается с помощью численных методов конечных разностей или конечных элементов [2].

Например [2], методом конечных элементов определяются электрические параметры зубцового деления ферромагнитного ВЭ ограниченной толщины и ВЭ с короткозамкнутой клеткой в прямоугольных пазах ферромассивного слоя.

При введении допущений об одномерности магнитного поля в зазоре между гладкими сердечниками ЛАД они вырождаются в цепи с распределенными параметрами и позволяют найти аналитические решения для электромагнитных величин, хотя и предполагают численный анализ конечных результатов.

Вводимые при построении модели допущения, а также методы моделирования должны обеспечивать компромисс между приемлемой сложностью и требуемой точностью расчетов. Этим стремлением объясняется большое количество литературных источников, в которых авторы предлагают различные модели, позволяющие с той или иной степенью точности учесть особенности линейных машин с их несимметрией электрических и магнитных цепей [2].

Стремительное развитие электронно-вычислительной техники и вместе с тем программного обеспечения к ней позволяют сдвинуть «ось» компромисса в сторону повышения точности получаемых результатов при решении поставленных задач. Это достигается путем уменьшения затрат времени при расчете большого количества математических уравнений. При этом снижается уровень вводимых при расчетах условий и допущений.

Одной из программ, позволяющих решать такие задачи, а также «связанные» или «междисциплинарные» задачи (линейная и нелинейная стационарная и нестационарная теплопроводность, линейный анализ напряженно-деформированного состояния), опирающиеся на полученные результаты, является «ELCUT».

ELCUT – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. ELCUT позволяет решать двумерные плоские и осесимметричные задачи.

В комплексе использован принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователю не требуется записывать системы уравнений и программировать методы их решения, а достаточно лишь создать в графическом редакторе геометрическую модель рассчитываемого устройства, а также задать свойства и параметры решаемой задачи. В результате получаемые результаты являются достаточно точными и весьма наглядными.

Используя ELCUT, производится работа с разными типами документов: задачи, геометрические модели, библиотеки свойств материалов и др. Каждый документ открывается в своём отдельном окне внутри главного окна ELCUT. Можно одновременно открыть любое число любых окон. Переходя из окна в окно, происходит переключение с одного документа на другой. Только одно окно в каждый момент времени является активным. Можно изменять содержание активного документа, используя позиции меню, расположенного вверху главного окна ELCUT. Содержание меню различно для документов разных типов. Можно использовать также контекстные меню, которые вызываются нажатием правой кнопки мыши на интересующем объекте в окне.

ELCUT использует следующие типы документов:

Описание задачи соответствует каждой физической задаче, решаемой при помощи ELCUT. Этот документ содержит такие общие характеристики как тип задачи ("Электростатика", "Магнитостатика", "Теплопередача" и пр.), класс модели (плоская или осесимметричная), а также имена других документов, ассоциированных с данной задачей.

Геометрическая модель содержит полное описание геометрии задачи, метки различных её частей и расчетную сетку конечных элементов (рис. 2). Разные задачи могут использовать общую модель (это, в частности, полезно при решении связанных задач).

Физические свойства или Данные различаются для разных типов задач (свойства для электростатики, свойства для вихревых токов и т.д.) Эти документы содержат значения свойств материалов, источников поля и граничных условий для разных помеченных геометрических объектов модели. Документ свойств может быть использован как библиотека материалов для различных задач.

Чтобы решить задачу, нужно ассоциировать с ней имена двух документов: модели и физических свойств. Для большего удобства задача может ссылаться на два документа свойств одновременно: один из них, называемый справочник свойств, содержит свойства часто используемых материалов (библиотека материалов), а другой документ содержит данные, специфичные для данной задачи или группы задач.

Между сеансами работы ELCUT документы сохраняются в дисковых файлах по одному файлу для каждого документа. В ходе сеанса можно создавать новые документы, открывать и сохранять существующие.

Использование этой гибкой архитектуры позволяет весьма быстро описать и решить задачу или серию задач. Типичная последовательность шагов при решении новой задачи представлена на блок-схеме (рис. 1).

Для расчета магнитных полей, возбужденных токами, синусоидально изменяющимися во времени и, наоборот, для расчета токов, индуцированных переменным магнитным полем в проводящей среде (вихревых токов) используется задача, анализирующая магнитное поле переменных токов.

При постановке задачи можно использовать следующие возможности:

– свойства сред: воздух, ортотропные материалы с постоянной магнитной проницаемостью, токнесущие проводники с известным напряжением или током;

- источники поля: приложенное напряжение, полный ток проводника, плотность тока или однородное внешнее поле;
- граничные условия: заданное значение потенциала (условие Дирихле), заданные значения касательной составляющей индукции (условие Неймана), условие постоянства потенциала (нулевого потока) на поверхностях сверхпроводников.

Результатами расчета являются: векторный магнитный потенциал, плотность тока, напряжение, магнитная индукция, напряженность магнитного поля, силы, моменты, омические потери, вектор Пойнтинга, энергия магнитного поля, импеданс, собственные и взаимные индуктивности.

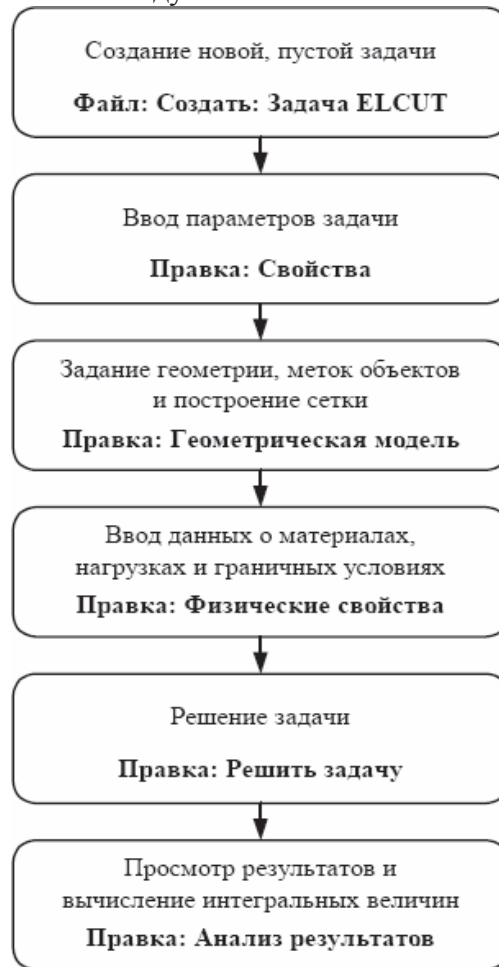


Рис. 1. Блок-схема последовательности шагов решения новой задачи

На рис. 2 показан пример общего вида и увеличенного участка результата расчета значения мгновенной плотности тока модели цилиндрического линейного асинхронного двигателя, представленный в графической форме. Длина статора и вторичного элемента данной модели составляет $L = 130$ мм, радиус статора равен $R_{ст} = 26$ мм, радиус вторичного элемента $R_{вэ} = 15$ мм, величина воздушного зазора при этом $\delta = 0,2$ мм.

Необходимо учесть, что расчеты проводятся только для режима неподвижного вторичного элемента.

Также можно использовать специальные возможности для отображения полученных данных в интересующей точке модели с помощью интегрального калькулятора, вычисляющего различные интегральные значения на проведенных линиях и поверхностях. К примеру, можно рассчитать тяговое усилие вышеупомянутой модели. Для этого необходимо всего лишь построить контур в интересующей области и нажать клавишу «интегральный калькулятор», расположенную на панели инструментов. Чтобы получить полное тяговое усилие модели, в построенный контур должна войти вся область вторичного элемента, для данной модели оно составляет $f = 10448 \text{ Н}$.

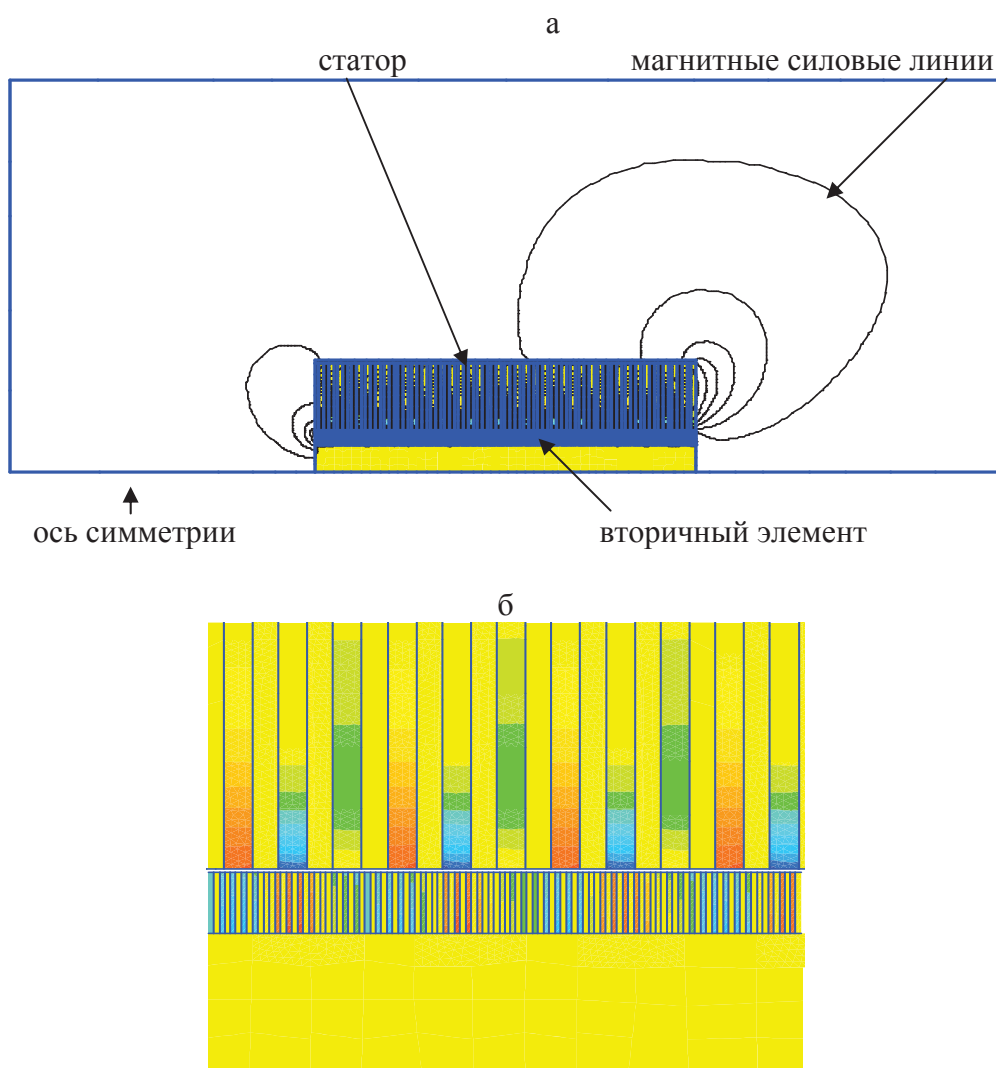


Рис. 2. Результаты расчета значения мгновенной плотности тока модели цилиндрического линейного асинхронного двигателя, представленный в графической форме с цветовой шкалой: а – общий вид; б – увеличенный участок

Магнитные силы могут быть переданы в задачу расчета механических напряжений в элементах конструкции (совмещенная магнито-упругая задача), а омические потери могут быть использованы в качестве источников тепла при анализе теплового поля (совмещенная термоэлектрическая задача).

Два мастера помогают вычислить собственную и взаимную индуктивность катушек и импеданс проводников (полное комплексное сопротивление переменному току). Обычно при расчетах магнитного поля переменных токов представляют интерес такие величины как полный электрический ток (с его сторонней и вихревой компонентами), электрическое напряжение, мощность тепловыделения (омические потери), индукция магнитного поля, напряженность магнитного поля, электромагнитные силы и их моменты, комплексное сопротивление (импеданс) индуктивность. Таким образом, программа ELCUT позволяет выполнить моделирование линейного асинхронного двигателя и рассчитать его основные характеристики.

1. Черных И.В. Основы теории и моделирование линейного асинхронного двигателя как объекта управления / И.В. Черных, Ф.Н. Сарапулов Екатеринбург, 1999. 229 с.

2. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели /О.Н. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.

3. Свечарник Д.В. Электрические машины непосредственного привода /Д.В. Свечарник М.: Энергоатомиздат, 1988. 208 с.

4. ELCUT – Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Руководство пользователя, версия 4.2Т. Производственный кооператив ТОР. СПб, 2004. 148 с.

5. Соколова Е.М. Линейные асинхронные двигатели для механизмов металлургического производства /Е.М. Соколова, Н.В. Копырина //Промышленная энергетика, 1999. № 9. С. 43 - 44.

6. Копырин В.С. Асинхронный частотно-управляемый отраслевой электропривод с эффективным инверторным торможением /В.С. Копырин, А.А. Ткачук, В.Р. Лисин, Е.В. Пустынных, В.А. Пастухов, З.М. Воронова //Промышленная энергетика, 1999. № 9. С. 28 - 31.

7. Иванушкин В.А. Особенности построения структурной модели линейного асинхронного двигателя /В.А. Иванушкин, Д.В. Исаков, Ф.Н. Сарапулов, П. Шымчак // Тезисы докладов 3 научно практической конференции: «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург, 2003. С. 94 -97.

8. Черных И.В. Идентификация частотных характеристик линейных асинхронных двигателей /И.В. Черных, А.В. Егоров // Тезисы докладов 3 научно практической конференции: «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург, 2003. С. 99 - 102.

9. Бегалов В.А. Исследование тяговых и нормальных усилий линейного асинхронного двигателя /В.А. Бегалов, С.Е. Миронов, А.Т. Горелов // Тезисы докладов 3-ей научно практической конференции: «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург, 2003. С. 103 - 106.