

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-2.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN217.pdf>

Статья опубликована 02.05.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Киселев А.В., Дорохина Е.С. Возможности имитационного моделирования работы вентильного электропривода в среде ANSYS Elecromagnetic // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/92TVN217.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 621.313.8

Киселев Александр Викторович

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, Томск¹
Ассистент кафедры «Электротехнических комплексов и материалов»
Кандидат технических наук
E-mail: kiselev_av@mail2000.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=738566

Дорохина Екатерина Сергеевна

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Россия, Томск
Ассистент кафедры «Электротехнических комплексов и материалов»
Кандидат технических наук
E-mail: dorohina@tpu.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_items.asp?id=841160

**Возможности имитационного моделирования
работы вентильного электропривода в среде
ANSYS Elecromagnetic**

Аннотация. Создание новых соединений и сплавов на основе редкоземельных материалов с каждым годом расширяет производство электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов. Благодаря таким преимуществам как отсутствие скользящего контакта, высокие энергетические показатели магнитоэлектрические машины находят широкое применение во многих отраслях техники. В настоящее время данные машины активно применяются для создания вентильного привода. Одной из главных задач при проектировании вентильного привода является исследование электромагнитных и электрических процессов в магнитоэлектрической машине.

В работе рассматриваются различные методы расчета магнитного поля электрической машины. Приведено описание программных продуктов отечественного и зарубежного производства на основе метода конечных элементов. Проведено исследование работы вентильного электропривода, применяемого в легковом автомобилестроении. Моделирование работы вентильного привода выполнялось в программной среде ANSYS с использованием приложений Maxwell 2D и Simplorer.

Авторами представлены комплексные расчеты, объединяющие в себе полевые и цепные задачи для изучения электромагнитных процессов в обмотках вентильного двигателя. Предложена схема моделирования, позволяющая рассмотреть совместное влияние

¹ 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

компонентов вентильного привода на работу магнитоэлектрического двигателя. Полученные результаты могут быть использованы для выбора электронных компонентов вентильного привода.

В статье использованы расчетные данные коллектива авторов, опубликованные ранее в материалах, распространяемых на конференциях, семинарах и других мероприятиях компании КАДФЕМ. КАДФЕМ представляет собой компанию - поставщика инженерных, учебных и информационных услуг.

Ключевые слова: вентильный привод; магнитоэлектрический двигатель; электромагнитные процессы; имитационное моделирование; метод конечных элементов; программные продукты; программная среда ANSYS

В настоящее время в различных областях техники и производства находят широкое применение электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов, которые часто носят название магнитоэлектрические. К основным достоинствам этих машин относятся:

- относительная простота конструкции (отсутствие обмоток возбуждения и скользящих контактов);
- высокое значение коэффициента полезного действия за счет меньших электрических и механических потерь на возбуждение и в скользящем контакте;
- простота обслуживания и увеличенный интервал межсервисного обслуживания.

Все большему распространению этих машин способствует значительный прогресс в области производства сплавов и соединений для высококоэрцитивных магнитов, среди которых можно отметить следующие: неодим-железо-бор (Ne-Fe-B), самарий-кобальт (Sm-Co) и другие [1]. Применение данных сплавов при изготовлении магнитоэлектрических машин позволило существенно снизить их массу и габариты. Данные показатели имеют принципиальное значение в таких областях применения как медицина, авиационная и космическая техника, робототехника.

Однако стоит отметить, что применение электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов без вспомогательного оборудования встречается редко. Как правило, магнитоэлектрические машины работают в составе вентильного привода. Под вентильным приводом понимают электропривод, в котором регулирование режима работы электродвигателя производится с помощью управляемых полупроводниковых преобразователей электрической энергии: выпрямителя, импульсного регулятора постоянного тока, преобразователя частоты. Вентильный двигатель (ВД) представляет собой электромеханотронную систему, в которой объединены: синхронная электрическая машина, как правило, с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ), электронный коммутатор (инвертор), посредством которого осуществляется питание обмоток якоря машины, и система автоматического управления инвертором, оснащенная необходимыми измерительными устройствами (датчиками) [2].

Учитывая особенности системы, в которой работают магнитоэлектрические машины, а также области их применения, при проектировании СДПМ необходимо соблюдать следующие требования:

1. Малые габариты и масса системы.
2. Высокая мощность и КПД.

3. Специальные требования (герметичное исполнение, стойкость к агрессивной среде и т.д.).
4. Согласованная работа всех элементов системы (СДПМ, выпрямитель, инвертор).

Одной из главных задач при проектировании магнитоэлектрических машин является изучение характера распределения магнитного поля по объему активной зоны машины, так как данный характер определяет массо-энергетические показатели разрабатываемой машины. Поэтому основой математической модели, описывающей электромагнитные процессы в электрических машинах, является расчет магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом и обмоткой якоря [1].

Расчет магнитного поля может быть осуществлен с использованием графоаналитических, аналитических и численных методов [3].

Широкое применение на ранних этапах развития электромеханики нашел графоаналитический метод решения уравнений магнитного поля. Магнитное поле электродвигателя строится посредством картины распределения вектора магнитной индукции в виде силовых трубок. После чего каждая из этих трубок описывается аналитическими уравнениями. Основным достоинством данного метода является простота расчета магнитного поля при сложных конфигурациях границ. Однако, нужно учитывать, что графоаналитический метод практически не позволяет учитывать влияние насыщения магнитной цепи на характер распределения магнитного поля. В связи, с чем графоаналитический метод не позволяет обеспечить достаточную точность расчетов. Низкая точность обусловлена как априорным построением картины магнитного поля, так и заменой реальных дифференциальных уравнений Максвелла эквивалентными интегральными уравнениями, предполагающими постоянство значения вектора магнитной индукции в силовой трубке [1, 4].

Аналитическое исследование синхронных машин с постоянными магнитами эффективно осуществляется с помощью схем замещения, в которых используется известная аналогия между магнитодвижущей силой (МДС) и электродвижущей силой (ЭДС), магнитным потоком и током, магнитной и омическими проводимостями [5]. Однако, использование данных методов расчета магнитного поля машины предполагает ряд допущений, в результате чего упрощается геометрическая форма магнитных трубок, предполагается постоянство потенциала поверхностей, на которые опираются трубки. При составлении схем замещения магнитной цепи основными допущениями являются: постоянство индукции на ее участках и, в частности, в теле магнита; линейный закон распределения потенциалов вдоль поверхности магнита.

В настоящее время применяются современные методы математического моделирования, основанные на решении уравнений электромагнитного поля электрической машины, которые дают большую точность расчетов. При таком подходе область существования этих полей рассматривается как сплошная среда, обладающая определенными магнитными и электрическими свойствами. Если в каждой точке исследуемой области задано значение физической величины, то говорят, что задано поле этой физической величины. Следовательно, исследование магнитных и электрических полей связано с определением значений этих величин в каждой точке исследуемой области [6].

Численные методы расчета магнитных полей, получившие в последние годы широкое распространение, в значительной мере обязаны прогрессу вычислительных машин, которые позволили исследователям решать с высокой степенью точности задачи по определению различных физических полей [7]. Среди численных методов расчета наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). Указанный метод расчета

реализован во многих программных пакетах, таких как CATIA, Solid Works, ELCUT, COMSOL Multiphysics и в рассматриваемом в данной статье программном комплексе ANSYS.

Задачей данной работы является детальное исследование электромагнитных и электрических процессов, происходящих в вентильном электроприводе, применяемом в легковом автомобилестроении.

В рассматриваемом электроприводе реализована классическая схема управления со следующей компоновкой: источник питания, электронный коммутатор (инвертор), магнитоэлектрический двигатель и нагрузка. Питание схемы осуществляется источником постоянного тока (аккумуляторная батарея). В инверторе применены IGBT транзисторы с изолированным затвором. Управление ключами выполняется при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Реализация ШИМ выполнена на аналоговых компараторах.

Магнитоэлектрический двигатель представляет собой синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов, расположенных на роторе. Магниты выполнены из сплава неодим-железо-бор (Ne-Fe-B) и имеют тангенциальное намагничивание. Так как питание магнитоэлектрического двигателя от инвертора с ШИМ может носить нестационарный характер, необходимо определить оптимальное значение частоты коммутации ключей инвертора, что позволит получить требуемое качество питания.

На первоначальном этапе исследования рассматриваемого электропривода был произведен расчет магнитного поля вентильного двигателя с помощью метода конечных элементов. Расчет магнитного поля двигателя выполнен в среде Maxwell 2D с использованием типа решения для нестационарных режимов (Transient). Данный тип решения позволяет производить расчет переходных процессов, а также пересчет магнитного поля электродвигателя в процессе вращения, при изменении нагрузки или питающего напряжения и т.д. Картина распределения магнитного поля в синхронном двигателе при работе при номинальной частоте в режиме холостого хода через 0,0165 сек после пуска, представлена на рисунке 1.

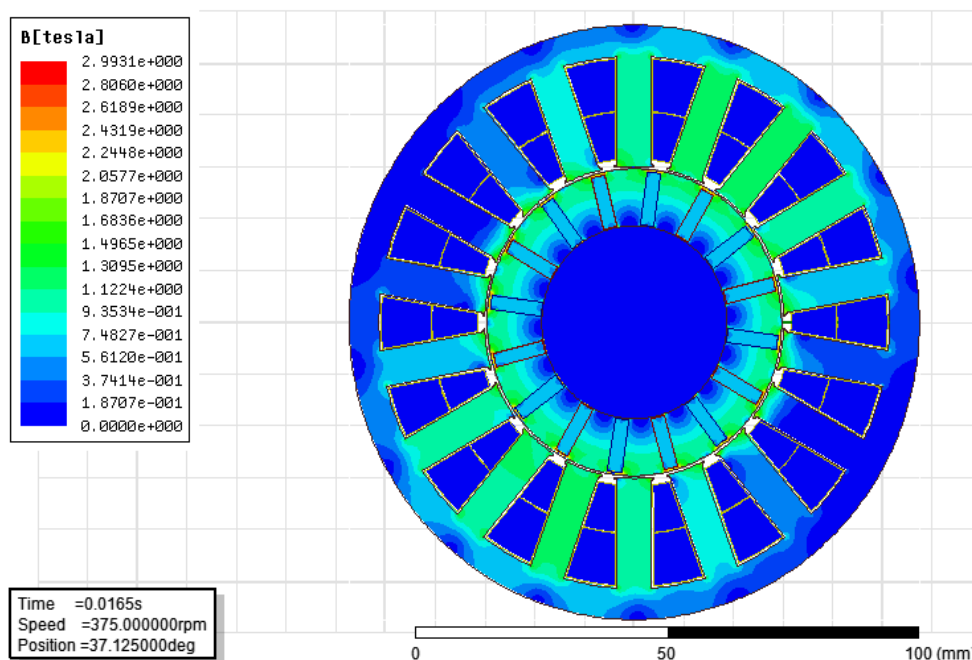


Рисунок 1. Картина распределения магнитного поля в поперечном разрезе вентильного двигателя (разработано авторами)

Проведенный анализ показал, что данные превышения индукции являются особенностью конструкции рассматриваемого двигателя.

Особо стоит отметить, что для соблюдения требований надежности вентиляльной машины при ее проектировании важно рассматривать работу всей электромеханотронной системы в целом. Ввиду сложности системы, количества изменяющихся внешних и внутренних параметров, исследование только вентиляльной машины и ее электромагнитных процессов во времени методом конечных элементов является недостаточным. Электромагнитный расчет в совокупности с расчетом процессов, происходящих во всей электрической цепи, включая нагрузку и ее характер, позволит более детально и достоверно исследовать систему [8].

До недавнего времени выполнение таких расчетов было невозможным. Однако, благодаря совмещению в одной модели величин из разных разделов физики, проведение таких расчетов в настоящее время стало реальным. Возможность одновременного расчета электромагнитных процессов, происходящих в электрической машине и электрических процессов в электронной схеме управления реализована в программной среде ANSYS благодаря симбиозу сред моделирования Maxwell 2D и Simplorer.

Для выполнения параллельного расчета электромагнитных процессов, происходящих в электрической машине и электрических процессов в электронной схеме управления, в среде Simplorer была создана схема инвертора. Нагрузкой инвертора являлся магнитоэлектрический двигатель, модель которого была импортирована в Simplorer из среды Maxwell.

Функциональная схема исследуемого вентиляльного привода в среде Simplorer представлена на рисунке 2.

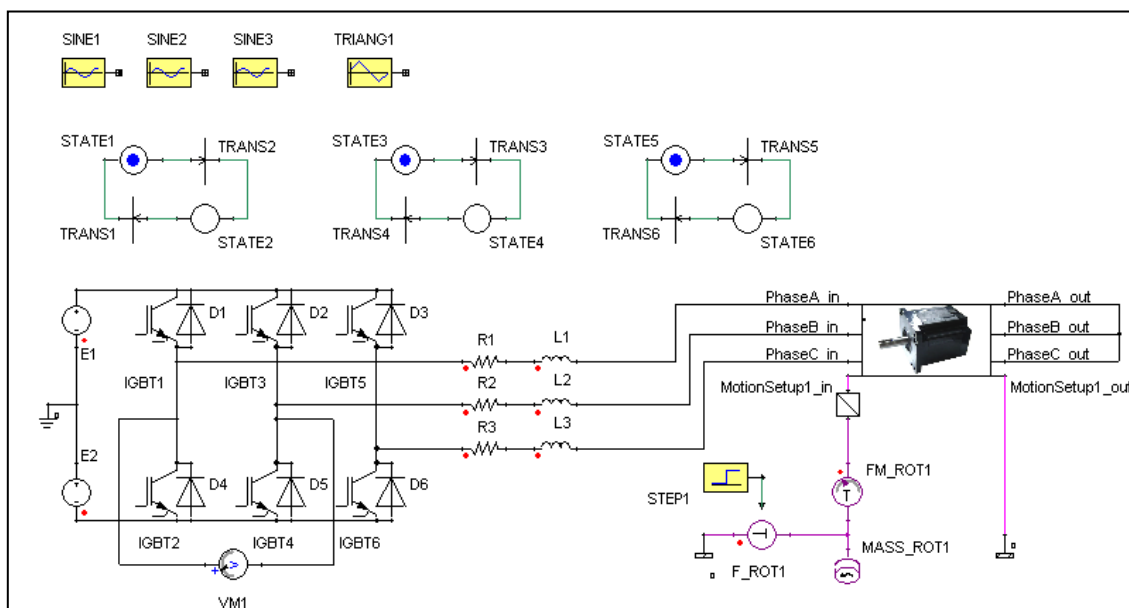


Рисунок 2. Схема вентиляльного привода в среде Simplorer (разработано авторами)

Моделирование данной схемы позволяет получить следующие результаты в динамике:

- напряжения и токи фазных обмоток;
- электромагнитный момент;
- электрические и магнитные потери;
- текущую позицию вращающихся элементов системы.

В разработанной модели были исследованы значения выходных напряжений и токов инвертора при трех различных вариантах частот управления ключами инвертора: 1, 5 и 10 кГц. На рисунках 3, 4 представлены значения фазных токов и напряжений при частоте управления ШИМ 1 кГц соответственно.

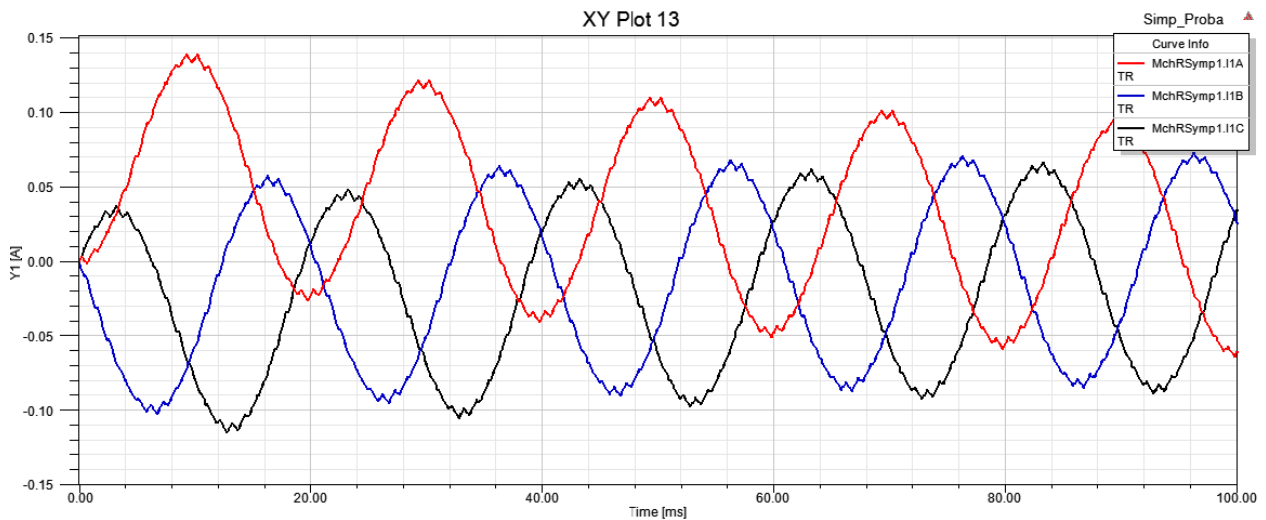


Рисунок 3. Фазные токи при частоте ШИМ 1 кГц (разработано авторами)

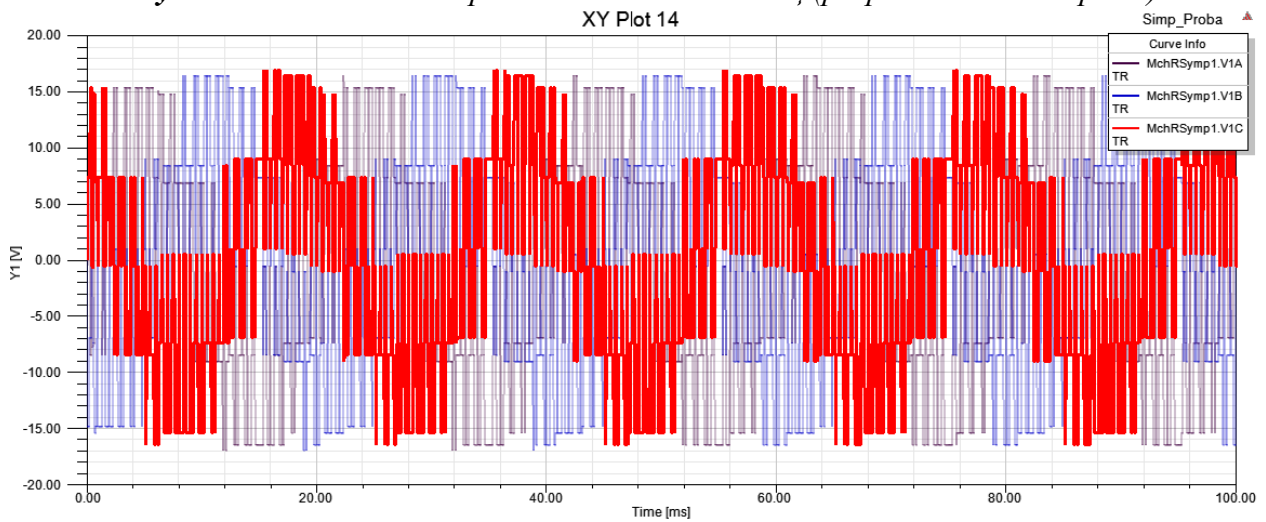


Рисунок 4. Фазные напряжения при частоте ШИМ 1 кГц (разработано авторами)

На рисунках 5, 6 представлены значения фазных токов и напряжений при частоте управления ШИМ 5 кГц соответственно.

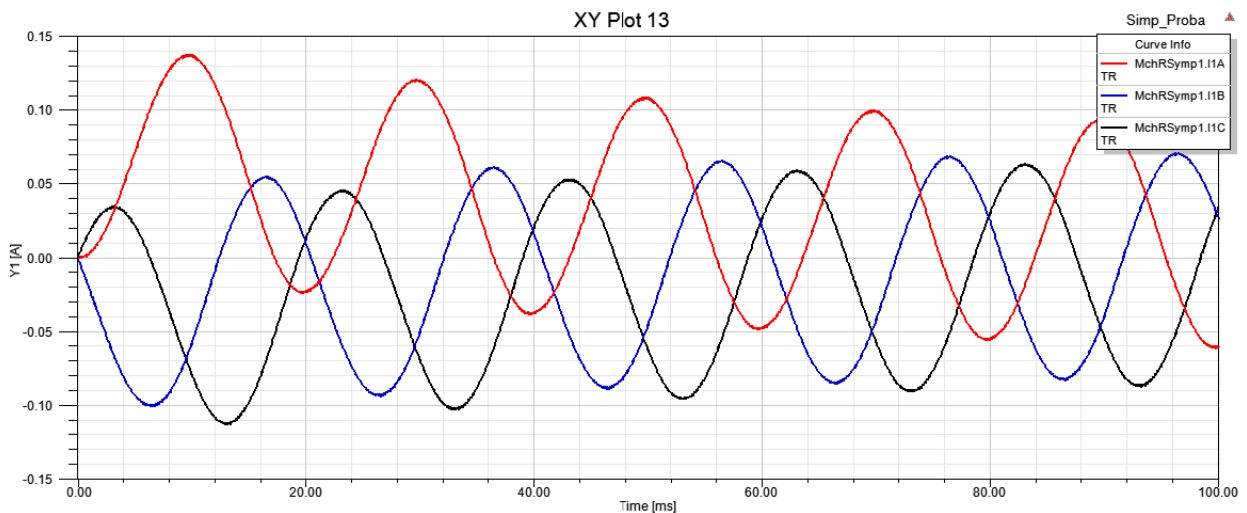


Рисунок 5. Фазные токи при частоте ШИМ 5 кГц (разработано авторами)

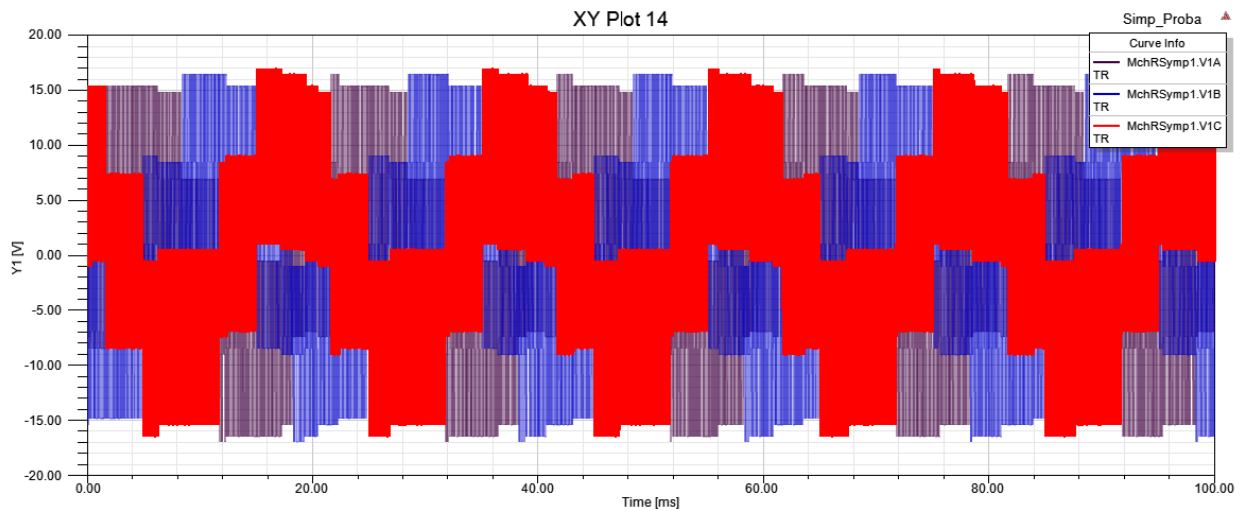


Рисунок 6. Фазные напряжения при частоте ШИМ 5 кГц (разработано авторами)

На рисунках 7, 8 представлены значения фазных токов и напряжений при частоте управления ШИМ 10 кГц соответственно.

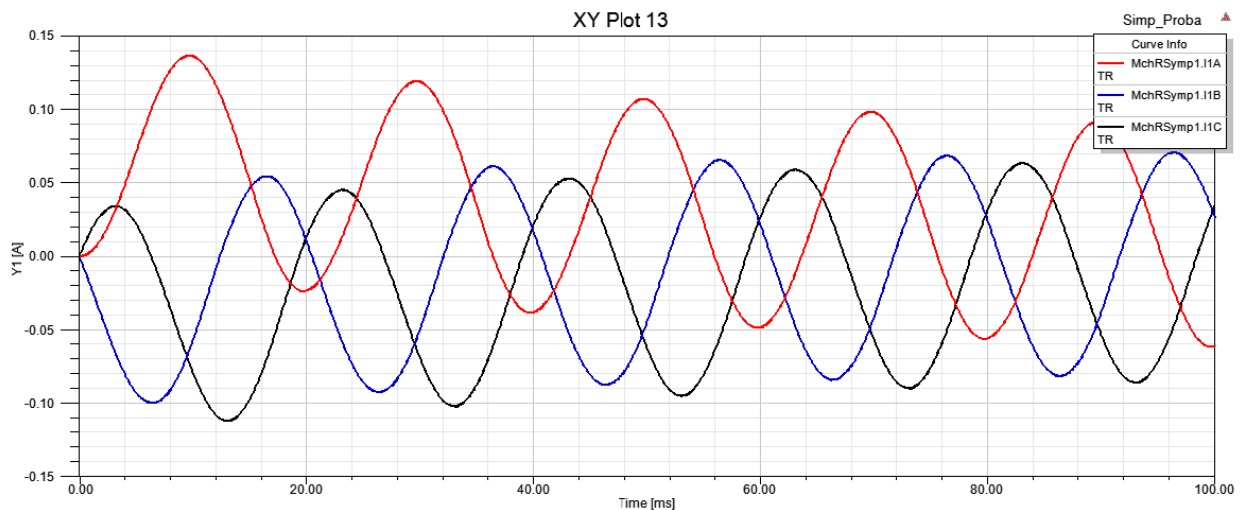


Рисунок 7. Фазные токи при частоте ШИМ 10 кГц (разработано авторами)

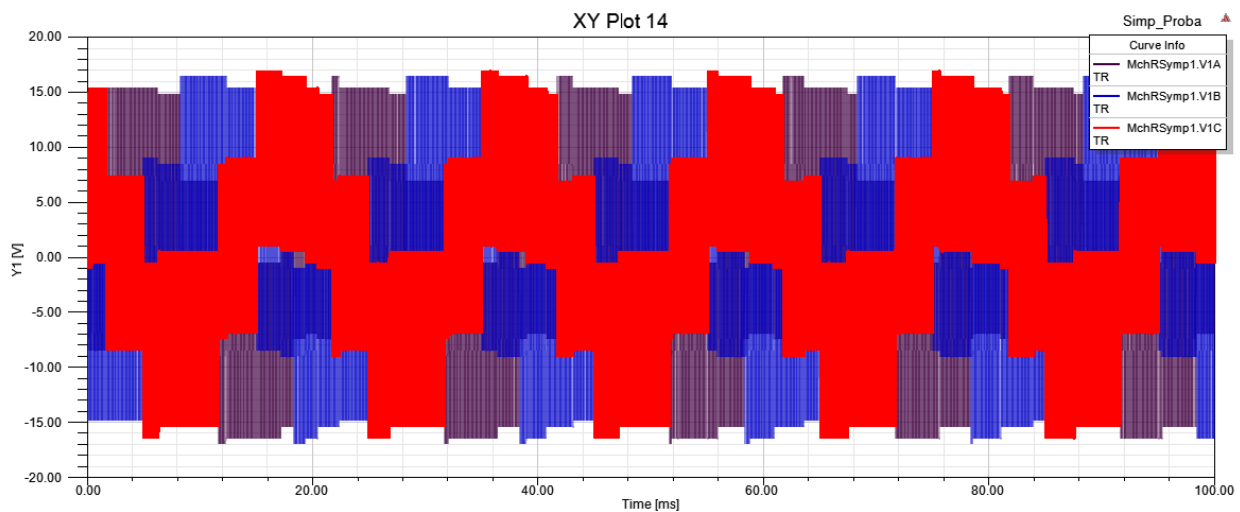


Рисунок 8. Фазные напряжения при частоте ШИМ 10 кГц (разработано авторами)

Величины частот 1, 5, 10 кГц были взяты условно для оценки работы двигателя и вентильного привода в целом и носили исследовательский характер. При проектировании подобных устройств, полученные величины фазных напряжений и токов позволят не только оценить работу всей системы (вентильный привод), но и качественно подобрать электронные компоненты и согласовать их работу с электромеханическим преобразователем.

Заключение

В работе показаны возможности пакета ANSYS по одновременному моделированию электромагнитных процессов, происходящих в электрической машине и электрических процессов в электронной схеме управления для получения более адекватной информации о работе системы в нестационарных режимах. Полученные результаты моделирования позволяют выработать рекомендации по совершенствованию электрической машины, выбрать систему управления и элементную базу для ее создания, а также находить оптимальные значения параметров систем управления при проектировании вентильных электроприводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев А.В. Магнитоэлектрический синхронный генератор для питания скважинной аппаратуры: диссертация канд. техн. наук. - Томск, 2014. - 154 с.
2. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза / В.В. Панкратов // Электронный компоненты. - 2007. №2. - С. 1-13.
3. Волченсков, В.И. Использование электрического моделирования для анализа состояния магнитной цепи электрических машин с постоянными магнитами / В.И. Волченсков // Электронный научно-технический журнал Инженерный вестник. - 2012. - №9. - С. 1-11.
4. Ледовский, А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами / А.Н. Ледовский. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 168 с.; ил.
5. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов / Д.А. Бут. - М.: Высш. шк., 1990. - 416 с.: ил.
6. Беляев, Е.Ф. Дискретно-полевые модели электрических машин: учеб. пособие. Ч. I, II / Е.Ф. Беляев, Н.В. Шулаков. - Пермь: Изд-во Перм. гос. Тех ун-та, 2009. - 457 с.
7. Фисенко, В.Г. Численные расчеты электромагнитных полей в электрических машинах на основе метода конечных элементов: учебное пособие по курсу «Электромагнитные расчеты», по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» / В.Г. Фисенко. - Моск. энерг. ин-т (МЭИ ТУ). - М.: Изд-во МЭИ, 2002. - 44 с.
8. Качин О.С. Исследование режимов работы системы синхронный генератор - схема питания - нагрузка с применением современных пакетов Maxwell и Simplorer [Электронный ресурс] / О.С. Качин, А.В. Киселев // Наукоедение. - 2012. - №4 - С. 1-8. - Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/81tvn412.pdf>.2.

Kiselev Aleksander Viktorovich

The national research Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk
E-mail: kiselev_av@mail2000.ru

Dorokhina Ekaterina Sergeevna

The national research Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk
E-mail: dorokhina@tpu.ru

The possibilities of simulation calculation of a switched-reluctance drive under operation in the ANSYS Electromagnetic

Abstract. The creation of new compounds and alloys based on rare-earth materials expands the production of electric motors with excitation from permanent magnets every year. Due to such advantages as lack of sliding contact, high power efficiency permanent magnets motors find wide application in many branches of equipment. Currently, these motors are actively used to create a switched-reluctance drive. The analysis of electromagnetic and electrical processes in permanent magnets motors in the design of a switched-reluctance drive is one of the main problem.

Different methods of magnetic field calculation of an electric motors are considered in this paper. Description of domestic and foreign production software products on the basis of the finite-element method is given. A study of the operation of a switched-reluctance drive used in passenger cars is produced. ANSYS software applications: Maxwell 2D and Simplorer are used to simulate the switched-reluctance drive operation.

Complex calculations which include field and circuit tasks for studying the operation of the switched-reluctance drive are considered. A simulation scheme that allows examining combined effect of the components of the switched-reluctance drive under the operation of the permanent magnets motor is presented. The obtained results can be used to select electronic components for the switched-reluctance drives.

The article uses the computational data of authors team published in the materials distributed at conferences, seminars and other events of the CADFEM company earlier. CADFEM is a company that provides engineering, training and information services.

Keywords: a switched-reluctance drive; a permanent magnets motor; electromagnetic and electrical processes; complex calculation; the finite-element method; software products; the finite-element method