

УДК 621.313

ПОДХОД К КОМБИНИРОВАННОМУ ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДОВ
ТЕОРИИ ПОЛЯ И МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
AN APPROACH TO THE COMBINED APPLICATION OF FIELD THEORY
AND MAGNETIC CIRCUIT METHODS FOR THE STUDY OF
ELECTROMECHANICAL RECIPROCATING ENERGY CONVERTERS

Менжинский А.Б., к-т. техн. наук, Малашин А.Н., к-т. техн. наук, доцент
Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь,
Сизиков С. В., к-т. техн. наук, доцент

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь
A. Menzhinsky, Candidate of Technical Sciences, A. Malashin, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor,
Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus
S. Sizikov, Candidate of Technical Sciences
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Аннотация. В своем большинстве применяемые в настоящее время математические модели электромеханических преобразователей энергии возвратно-поступательного движения основываются на теории магнитных цепей. Такие математические модели базируются на упрощенном представлении о магнитной системе и магнитном поле. Однако в отличие от традиционных электрических машин вращательного типа, электромеханические преобразователи энергии возвратно-поступательного движения обладают рядом особенностей, учет которых имеет важное значение при их исследовании и проектировании. Поэтому на начальных этапах электромагнитного расчета и при решении задач оптимизации требуется применение адекватных математических моделей для повышения точности расчетов параметров указанных электромеханических преобразователей энергии. С этой целью может использоваться математическая модель, основанная на теории поля, однако основным ее недостатком является сложность применения для решения задач оптимизации. Поэтому, при разработке и исследовании электромеханических преобразователей энергии возвратно-поступательного движения, целесообразней всего использовать подход к комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей.

Annotation. Most of the currently used mathematical models of electromechanical reciprocating energy converters are based on the theory of magnetic circuits. Such mathematical models are based on a simplified view of the magnetic system and the magnetic field. However, unlike traditional electric machines of the rotary type, electromechanical energy converters of reciprocating motion have a number of features that are important to take into account when studying and designing them. Therefore, at the initial stages of electromagnetic calculation and when solving optimization

problems, it is necessary to use adequate mathematical models to improve the accuracy of calculations of the parameters of these electromechanical energy converters. For this purpose, a mathematical model based on field theory can be used, but its main drawback is the complexity of its application for solving optimization problems. Therefore, in the development and research of electromechanical energy converters of reciprocating motion, it is most appropriate to use an approach to the combined application of the methods of field theory and magnetic circuits.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь энергии, электромагнитное поле, метод конечных элементов, теория поля, магнитные цепи.

Key words: electromechanical energy converter, electromagnetic field, finite element method, field theory, magnetic circuits.

ВВЕДЕНИЕ

В исследовании электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ) важную роль играют методы математического моделирования. Математическому моделированию различных типов ЭМПЭ посвящены научные работы ряда зарубежных ученых: А.И. Вольдека, А.Д. Подольцева, Г. Уайта, Д. Вудсона, И.Е. Овчинникова, М.Я. Хитерера, В.А. Балагурова, И.П. Копылова, А.В. Иванова-Смоленского, И.Г. Ефимова, Д.А. Бута, А.П. Синицина, С.А. Тарашева, Н.Л. Бабиковой, Р.Р. Саттарова, Е.В. Сергеенковой, I. Voldea, H. Polinder, M.A. Mueller, В.Е. Высоцкий, Д.Э. Брускина и многих других [1–5].

Анализ научных работ [6–12] показал, что в настоящее время выделяют два основных подхода к расчету электромагнитных полей в ЭМПЭ. Это подходы, основанные на теории магнитных цепей и теории поля.

Теория поля развивается на основе уравнений Максвелла, а теория цепей – на основе уравнений Кирхгофа. Также можно выделить, наиболее прогрессивный подход – комбинированный, сочетающий в себе теорию поля и теорию магнитных цепей [5].

В отличие от традиционных ЭМПЭ вращательного типа, ЭМПЭ возвратно-поступательного движения (ЭМПЭ ВПД) обладают рядом особенностей (неравномерность распределения магнитного потока в воздушном зазоре магнитной системы, переменный характер воздушного зазора между подвижной и неподвижной частями [1]), учет которых имеет важное значение при их исследовании и проектировании. Поэтому целью работы является обоснование необходимости использования подхода к комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей для исследования и расчета ЭМПЭ ВПД.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Подходы, основанные на теории магнитных цепей, широко применяются для получения инженерных расчетов, с помощью которых определяются основные характеристики ЭМПЭ на начальных этапах электромагнитного расчета [2]. Преимуществом цепных методов является то, что построенные на их базе математические модели (ММ) ЭМПЭ удобно применять при решении задач оптимизации. Методы теории магнитных цепей базируются на упрощенном

представлении о магнитной системе и магнитном поле в виде магнитной цепи с соответствующими магнитными проводимостями [4].

Основные недостатки этого метода заключаются в следующем: не в полной мере учитываются особенности распределения магнитного поля в магнитной системе; теория магнитных цепей позволяет получить лишь приблизительные значения параметров магнитной системы; ММ ЭМПЭ не учитывают особенности конфигурации магнитной системы, нелинейность кривой намагничивания ферромагнитных материалов, неравномерность распределения магнитного потока в воздушном зазоре.

Это не позволяет получить достоверные результаты при расчете характеристик ЭМПЭ. Поэтому, метод на основе теории магнитных цепей целесообразно применять на этапе предварительного оценочного электромагнитного расчета ЭМПЭ. Для повышения адекватности ММ ЭМПЭ ВПД необходимо уточнение полученных магнитных проводимостей воздушных зазоров ЭМПЭ посредством метода на основе теории поля [5].

Математические модели на основе теории поля, использующие численные методы, универсальны [5]. Они позволяют учесть конфигурацию магнитной системы ЭМПЭ ВПД, насыщение участков магнитопровода, различие магнитных свойств среды на границах рабочей и торцевой зоны, неравномерность воздушного зазора и другие особенности распределения магнитного поля [7].

Среди численных методов наиболее распространенным следует признать метод конечных элементов (МКЭ) [7]. Достаточно простое и универсальное математическое описание МКЭ инициировало появление большого количества прикладных математических компьютерных программ, позволяющих решать задачи расчета физических полей. Среди положительно зарекомендовавших себя программ можно выделить Ansoft Maxwell, Ansys, Elcut [3].

Достоинства метода на основе теории поля заключаются в следующем [13]: возможность учета нелинейных свойств материалов и насыщений, что делает результаты расчета максимально точными; расчет характеристик ЭМПЭ производится по реальной геометрии магнитной системы, созданной в системе автоматизированного проектирования, что максимально приближает результаты расчета к действительности.

Основными недостатками метода на основе теории поля являются [13]: высокая трудоемкость подготовки задачи к расчету и длительное время получения результатов; результаты расчета являются массивами численных данных.

Поэтому, метод на основе теории поля целесообразно использовать на завершающих этапах электромагнитного расчета ЭМПЭ ВПД для уточнения полученных характеристик.

Комбинированный подход (сочетание методов теории поля и магнитных цепей) к расчету ЭМПЭ. Комбинированный подход к расчету ЭМПЭ следует считать двухэтапным.

Первый этап позволяет определить исходные данные для последующего, что существенно уменьшает затраты на втором этапе выполнения расчетов [13]. Первый этап является приближенный расчет, не требующий больших затрат усилий и времени, но дающий возможность с определенной точностью оценить

энергетические и массогабаритные характеристики ЭМПЭ, а также выполнить оптимизацию. На первом этапе расчета ЭМПЭ целесообразно использовать ММ на основе теории магнитных цепей.

Второй этап основан на более точных ММ, часто включает в себя поверочный расчет по исходным данным, полученным на первом этапе, с последующим их уточнением. Обычно этот этап основан на значительно меньшем количестве допущений и дает более достоверные результаты, но требует больших ресурсов и вычислительных затрат. На втором этапе расчета ЭМПЭ целесообразно использовать ММ на основе теории поля.

Такой подход является комбинированным. Комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей для расчета электромагнитных полей посвящено много работ [8, 10, 14, 15]. Общей целью применения такого подхода является объединение преимуществ и исключение недостатков, характерных для отдельно взятых методов на основе теории поля и магнитных цепей [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так как, ЭМПЭ ВПД обладают рядом особенностей, учет которых имеет важное значение при их исследовании и проектировании. В связи с этим, необходимо использовать подход к комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей для исследования и расчета ЭМПЭ ВПД. Метод на основе теории поля целесообразно использовать для уточнения параметров ЭМПЭ на завершающих этапах электромагнитного расчета, а для начального оценочного расчета и при решении задач оптимизации целесообразно использовать ММ, построенные на основе цепных методов.

Использование подхода к комбинированному применению методов теории поля и магнитных цепей при исследовании и расчете ЭМПЭ ВПД позволит сократить затраты на их создание (за счет уменьшения продолжительности проектирования и экспериментальной доработки).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хитерер, М.Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения : учеб. пособие / М.Я. Хитерер, И.Е. Овчинников. – СПб. : Корона принт, 2013. – 357 с.
2. Сергеенкова, Е.В. Синхронная электрическая машина возвратно-поступательного движения (генератор) : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Е.В. Сергеенкова. – М., 2011. – 118 л.
3. Сеницин, А.П. Совершенствование линейных генераторов с постоянными магнитами для автономных объектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / А.П. Сеницин. – Самара, 2013. – 124 л.
4. Бабилова, Н.Л. Генератор-возвратно поступательного движения в автономной системе электроснабжения маломощных потребителей : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Н.Л. Бабилова. – Уфа, 2009. – 147 л.
5. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин : учебник / И.П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с.

6. Афанасьев, А.А. Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики / А.А. Афанасьев. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. – 390 с.
7. Буль, О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM : учеб. пособие / О.Б. Буль. – М. : Академия, 2005. – 336 с.
8. Горбатенко, Н.И. Комбинированный метод магнитных цепей и граничных элементов для определения магнитных характеристик материалов изделий / Н.И. Горбатенко, В.В. Гричихин // Изв. вузов. Электромеханика. – 2000. – № 1. – С. 15–20.
9. Демирчян, К.С. Машинные расчеты электромагнитных полей : учеб. пособие / К.С. Демирчян, В.П. Чечурин. – М. : Высш. шк., 1986. – 240 с.
10. Иванов-Смоленский, А.В. Универсальный численный метод моделирования электромеханических преобразователей и систем / А.В. Иванов-Смоленский, В.А. Кузнецов // Электричество. – 2000. – № 7. – С. 24–33.
11. Курбатов, П.А. Численный расчет электромагнитных полей / П.А. Курбатов, С.А. Аринчин. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 167 с.
12. Шоффа, В.Н. Методы расчета магнитных систем постоянного тока : метод. рук. для практ. занятий / В.Н. Шоффа. – М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1998. – 40 с.
13. Бормотов, А.В. Модульная электрическая машина и мехатронная система на ее основе : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А.В. Бормотов. – СПб, 2016. – 204 л.
14. Демирчян, К.С. Моделирование магнитных полей / К.С. Демирчян. – Л. : Энергия, 1974. – 285 с.
15. Тихонов, Д.Ю. Комбинированный метод расчета нестационарных плоскопараллельных электромагнитных полей / Д.Ю. Тихонов, А.Н. Ткачев, Й. Центнер // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 4. – С. 39–48.
16. Менжинский, А.Б. Анализ современных методов исследования электромеханических преобразователей энергии [Электронный ресурс] / А.Б. Менжинский, А.Н. Малашин, П.Б. Менжинский // Изобретатель Международный научно-технический журнал. – Режим доступа: www.izobretatel.by/nauchnye-publikacii/issledovaniya-elektromehnicheskih-preobrazovateley-energii/. – Дата доступа: 21.02.2020.