

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.313

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО- ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА

А.М. КОПЫЛОВ, А.Р. САФИН, Р.Р. ГИБАДУЛЛИН,
Л.В. ДОЛОМАНЮК, А.Н. ЦВЕТКОВ

Казанский государственный энергетический университет

В статье предлагаются наиболее перспективные конструкции электрических машин возвратно-поступательного действия, а также многомодульная концепция их проектирования. Разработан алгоритм и создана компьютерная программа на базе Microsoft Excel, позволяющая определить необходимое количество модулей для обеспечения требуемой мощности электрической машины возвратно-поступательного действия. Подтверждена работоспособность разработанного программного комплекса.

Ключевые слова: обратимая электрическая машина возвратно-поступательного действия, модульная конструкция, линейный генератор, автономный источник электроэнергии.

На сегодняшний день подавляющая часть электрической энергии в Российской Федерации вырабатывается на крупных электростанциях и распространяется по электрическим сетям общего пользования. Тем не менее, по разным оценкам, 60 – 70 % территории России не охвачены централизованным электроснабжением. На этой территории проживает более 20 млн. человек и жизнедеятельность людей обеспечивается, главным образом, средствами малой и микроэнергетики. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года определила развитие малой энергетики в качестве одного из ключевых направлений развития энергетического сектора. В стране уже сегодня функционируют порядка 50 тысяч объектов малой распределенной генерации. Однако в ближайшие 7 – 10 лет должна быть поставлена задача в несколько раз увеличить их суммарную установленную мощность, которая в настоящее время составляет 12 ГВт, и увеличить на них производство электроэнергии (сейчас – 24 млрд. кВт·ч) с целью еще более надежного электроснабжения потребителей (по официальным данным МинЭнерго России).

Широкое применение получают мобильные и стационарные энергоустановки микроэнергетики (мощностью до 100 кВт) на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС), генерирующие электроэнергию для сверхмалых одиночных потребителей, а также применяющиеся в качестве источников энергии в гибридном автотранспорте.

В качестве преобразователей механической энергии возвратно-поступательного движения поршней ДВС в электрическую энергию в таких установках преимущественно применяются ротационные (вращательные) электрические машины. Достигается это при помощи кинематических передач, усложняющих конструкцию и снижающих коэффициент полезного действия установки. Применение линейных электрических машин возвратно-поступательного действия позволяет устранить эти недостатки, а модульная конструкция позволит масштабировать энергоустановку по мощности для конкретной задачи.

Наиболее перспективными являются цилиндрические конструкции электрических машин возвратно-поступательного действия (рис. 1 [1]), коэффициент полезного действия которых достигает 93 – 95%, в то время как КПД плоских машин составляет всего 60 – 62% [2]. Достигается это за счет отсутствия продольного краевого эффекта при замкнутом исполнении магнитопровода цилиндрических линейных машин.

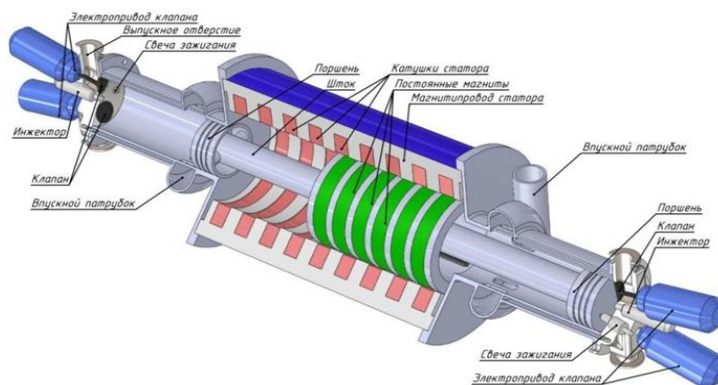


Рис. 1. Конструкция электрической машины возвратно-поступательного действия на основе свободнопоршневого двигателя

Из различных видов цилиндрических электрических машин возвратно-поступательного действия целесообразно выделить машины с постоянными магнитами, расположенными на подвижном элементе (трансляторе), преимуществом которых является реализация подвижной магнитной системы из кольцевых постоянных магнитов с радиальной и осевой намагниченностью в виде Холбах-массива (*англ. Halbach-array*) [3]. Холбах-массив представляет собой последовательность постоянных магнитов с циклически изменяемой угловой ориентацией вектора намагниченности. При этом, во-первых, в идеальном случае вектор намагниченности синусоидально изменяется в пространстве, что приводит к минимизации пульсации межзубцового сцепления без применения специальных мер в виде скашивания пазов, а во-вторых, магнитные потоки замыкаются внутри электрической машины, не рассеиваясь снаружи, – эффект самоэкранирования [4].

Окончательный выбор наиболее эффективной конструкции электрической машины производится по её удельным характеристикам.

Для анализа были разработаны три варианта конструктивного исполнения линейной электрической машины цилиндрического типа с постоянными магнитами, показанные на рис. 2, а; 2, б; 2, в соответственно, имеющие различия в конструкции обмоток статора и постоянных магнитов транслятора, а также различную длину активных элементов: статора и подвижной части.

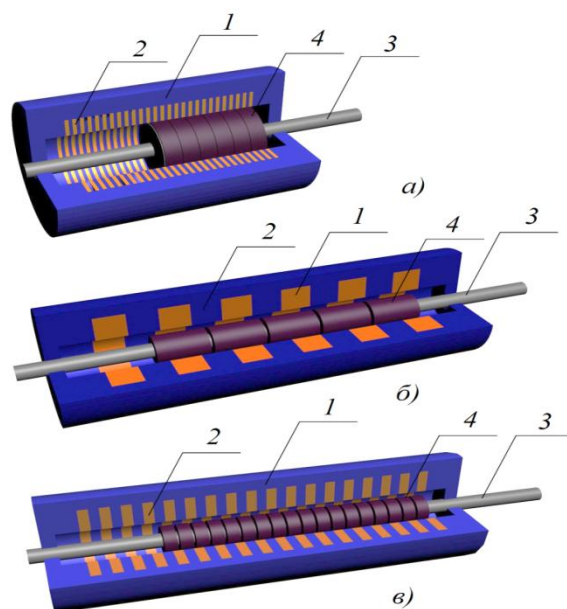


Рис. 2. Исследуемые образцы линейной электрической машины: 1 – ярмо статора; 2 – медная обмотка статора; 3 – титановый полый стержень; 4 – кольцевые постоянные магниты *Nd-Fe-B*

Основные конструктивные параметры для трех исследуемых вариантов представлены в таблице.

Таблица

Основные параметры исследуемых образцов электрических машин

Параметр	Значение по вариантам		
	1	2	3
Параметры транслятора			
Ширина постоянного магнита, мм	24	72,8	18
Воздушный зазор между магнитами, мм	0,75	5	3,5
Внешний диаметр постоянного магнита, мм	106	50	50
Внутренний диаметр постоянного магнита, мм	100	25	25
Количество постоянных магнитов, шт.	6	5	18
Длина основания постоянных магнитов, мм	150	384	384
Внешний диаметр основания магнитов, мм	100	25	25
Диаметр полого титанового штока, мм	25	25	25
Толщина стенок штока, мм	5	5	5
Длина штока, мм	500	750	750
Длина рабочего хода транслятора, мм	120	120	120
Масса кольцевого постоянного магнита, кг	0,2	0,52	0,15
Масса основания постоянных магнитов, кг	1	0,35	0,35
Масса штока, кг	1,5	1,1	1,1
Масса транслятора, кг	2,8	3,7	3,7
Частота колебания транслятора, Гц	20	20	20
Скорость перемещения транслятора, м/с	4,8	4,8	4,8
Параметры статора			

Ширина одного паза с обмоткой, мм	5	42	14
Глубина паза, мм	30	42	42
Расстояние между пазами обмотки, мм	5	42	14
Количество пазов с обмотками, шт.	27	6	18
Активная длина статора, мм	270	504	504
Длина статора, мм	360	594	594
Внутренний диаметр статора, мм	112	75	75
Внешний диаметр статора, мм	232	200	200
Масса одной обмотки, кг	0,4	4,2	1,4
Масса статора, кг	88,6	132,1	144,4
Общие параметры электрической машины			
Масса электрической машины, кг	91,4	136	148,3

Для расчета величины магнитных потоков, создаваемых постоянными магнитами и обмоткой статора, выполнялся расчет магнитного поля в активной зоне электрической машины методом конечных элементов с применением численных методов математического моделирования.

Задача решалась в осесимметричной постановке, для чего была разработана осесимметричная конечно-элементная модель электрической машины на основе моделей, представленных в работе [5], в которых методом перемещения сетки моделировалась нестационарная задача перемещения подвижного элемента относительно магнитной системы статора.

Отличием модели является то, что она содержит две системы дифференциальных уравнений электрического состояния фаз, а также систему алгебраических уравнений магнитного состояния для магнитной схемы замещения.

В результате усилие F , действующее на транслятор, определяется как произведение транспонированной матрицы векторов мгновенных значений индукций в участках зазора (B_{22}^T) на матрицу векторов мгновенных значений неизвестных токов фаз (I_C) и записывается в виде

$$F = [(DI)((S_{TA})(I))]^T ((S_S)(I)), \quad (1)$$

где (DI) – матрица формирования производных по координате с ненулевыми элементами.

Конечная длина активных элементов электрической машины (статора и транслятора) влияет на её эффективность следующим образом. При равной длине статора и транслятора электромагнитная сила, действующая на транслятор, снижается при отдалении транслятора от центра. Это происходит потому, что часть транслятора выходит за пределы зоны действия магнитного поля статора. Для обеспечения постоянства действующей силы соотношение длин транслятора и статора должно быть не более 3:4 соответственно.

Масштабирование мощности на данном этапе обусловлено упрощенной реализацией системы из нескольких модулей, при этом статорные обмотки могут соединяться последовательно или параллельно при переменной нагрузке с сопротивлением R_H .

Предположим, имеется N модулей, соединенных последовательно или параллельно, номера которых 1,2,3 ... n . Подбирая натуральные числа N и n , можно

параллельно соединять N/n ветвей, а каждая ветвь будет состоять из n последовательно соединенных модулей. При этом ветвь будет иметь ЭДС, равную $n \cdot E$, и внутреннее сопротивление $n \cdot r$. При подключении внешней нагрузки величина тока обратной электрической машины возвратно-поступательного действия записывается в виде выражения (2), а мощность – (3):

$$I = \frac{n \cdot E}{n^2 \cdot r / N + R_H}; \quad (2)$$

$$P = I^2 \cdot R_H = \frac{(n \cdot N \cdot E)^2}{(n^2 \cdot r + N \cdot R_H)^2}. \quad (3)$$

Фиксируя N и изменяя n , можно определить максимум передаваемой мощности. При этом точка локального максимума равна $n_{\max} = \sqrt{N \cdot R_H / r}$, а величина тока и мощность записываются, соответственно, в виде:

$$I_{\max} = \frac{E}{2\sqrt{\frac{r \cdot R_H}{N}}}; \quad P_{\max} = \frac{N \cdot E^2}{4r}. \quad (4)$$

Условные максимумы проявляются при максимальном $N=4$, далее $N=6$ и т.д. При $N=9$ значения токов иррациональны.

На основе данного алгоритма была создана компьютерная программа на базе *Microsoft Excel*, позволяющая при любых параметрах каждого модуля определить необходимое их количество. В ней также возможно точно определить значения выходных параметров при любом количестве модулей. Полученные данные подтвердились при постройке аналогичной схемы в программе схемотехнического моделирования *Multisim* (рис. 3).

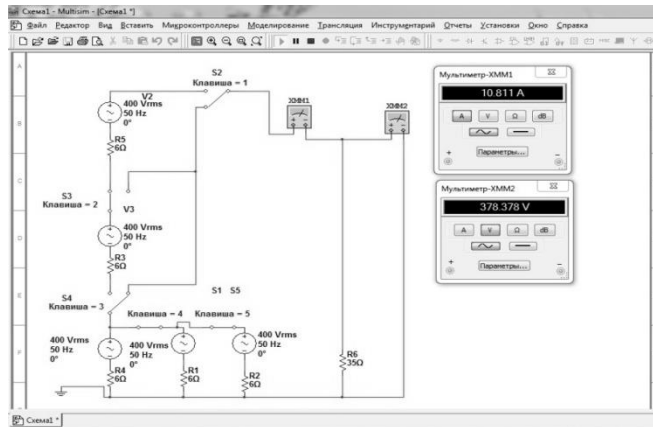


Рис. 3. Один из вариантов схем расположения модулей обратной электрической машины возвратно-поступательного действия, воспроизведенный в программе схемотехнического моделирования

Multisim

Выводы

1. Проведен анализ существующих электрических машин возвратно-поступательного действия и их характеристик;
2. Принято решение о применении многомодульной концепции при разработке электрических машин возвратно-поступательного действия;

3. Разработан алгоритм и создана компьютерная программа на базе *Microsoft Excel*, позволяющая определить необходимое количество модулей для обеспечения требуемой мощности электрической машины возвратно-поступательного действия.

4. Подтверждена работоспособность разработанного программного комплекса на базе *Microsoft Excel*.

Следующим этапом является проверка и корректировка модели модульного сопряжения электрической машины возвратно-поступательного действия путем сравнения с реальными характеристиками опытного образца.

Научные исследования проводились по теме: «Разработка экспериментального образца обратимой электрической машины возвратно-поступательного действия мощностью 10 – 20 кВт для тяжелых условий эксплуатации» при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от «20» октября 2014 г. № 14.577.21.0121 – 5 этап, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0121.

Summary

The article offers the most advanced design of electrical machines reciprocating action as well as a multi-concept of their design. An algorithm and a computer program based on Microsoft Excel, allowing to determine the number of modules to provide the required power of the electric machine reciprocating. Confirmed performance of the developed software.

Keywords: reversible electric machine of reciprocating action, the modular construction, the linear generator, the autonomous source of electric power.

Литература

1. Духанин В.И. Автомобильный генератор возвратно-поступательного движения. Анализ конструкции. М.: МГТУ «МАМИ», 2010.
2. Рьжков А.В. Анализ и выбор рациональных конструкций цилиндрического линейного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением: дис. канд. техн. наук. Воронеж. гос. техн. ун-т. Воронеж: 2008. 154 с.
4. Jang S. Thrust Analysis and measurements of tubular linear actuator with cylindrical Halbach-array // IEEE Transactions on magnetics. 2005. V. 41. May.
4. Высоцкий В.Е. Линейный генератор с постоянными магнитами для систем электропитания автономных объектов // Известия вузов. Электромеханика. 2010. №1. С. 80-82.
5. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. Красноярск: Изд-во ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», 2013.

Поступила в редакцию

25 октября 2016 г.

Копылов Андрей Михайлович – аспирант 3 года обучения кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (960) 057-10-05. E-mail: kopylov.scl@inbox.ru.

Сафин Альфред Робертович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(952) 044-16-05. E-mail: sarkazan@mail.ru.

Гибадуллин Рамил Рифатович – аспирант 4 года обучения кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(952)038-13-64. E-mail: torianin@mail.ru.

Доломанюк Леонид Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(904)667-57-30. E-mail: leonid-888@mail.ru.

Цветков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» (ЭПП) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(917)227-84-37. E-mail: cvetkov.an@mail.ru.