



**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СВОБОДНО-ПОРШНЕВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ НА БАЗЕ  
СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ  
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОСТОЯННЫМИ  
МАГНИТАМИ**

**А.Р. Сафин, И.В. Ившин, Е.И. Грачева, Т.И. Петров**

**Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия**  
*sarkazan@bk.ru*

**Резюме:** Одним из актуальных трендов на настоящее время является развитие малой энергетики, что является особенно актуальной задачей для Российской Федерации с ее огромными территориями и спецификой электроэнергетической системы.

Использование синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами в энергетических установках модульного типа позволяет рационально спроектировать автономный источник электроснабжения, получить наиболее оптимальную конструкцию.

Разработано математическое описание термодинамических, электромеханических и тепловых процессов, происходящих в рассматриваемом энергетическом комплексе (синхронный двигатель), что является необходимым условием для проектирования и оптимизации конструкции автономного электроэнергетического комплекса.

Согласно теоретическим выкладкам в приложении Matlab на базе дополнительного модуля Simulink была разработана и рассчитана имитационная модель свободно-поршневого двигателя внутреннего сгорания, блоки расчета линейной токовой нагрузки, магнитной индукции статора, магнитной индукции, создаваемой постоянными магнитами индуктора, электромагнитной силы.

Созданная методика расчета параметров электромагнитной составляющей силы синхронной машины с постоянными магнитами позволяет провести расчет и оптимизацию конструктивных параметров индукторного и статорного элемента рассматриваемого электрического двигателя, что повышает энергоэффективность всей системы.

**Ключевые слова:** синхронная электрическая машина, имитационное моделирование, электромеханика, тепловая модель, малая энергетика.

**Для цитирования:** Сафин АР., Ившин ИВ., Грачева ЕИ., Петров ТИ. Разработка математической модели автономного источника электроснабжения с свободно-поршневым двигателем на базе синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия с постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020.Т. 22. № 1. С. 38-48. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-38-48.

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF AN AUTONOMOUS POWER  
SUPPLY SOURCE WITH A FREE PISTON MOTOR ON THE BASIS OF A  
SYNCHRONOUS ELECTRIC RETURNING MACHINE WITH A PERMANENT  
MAGNETS**

**AR Safin, IV Ivshin, EI Gracheva, TI Petrov**

**Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia**  
*sarkazan@bk.ru*

**Abstract:** One of the current trends at present is the development of small energy, which is a particularly urgent task for the Russian Federation with its vast territories and the specifics of the electric power system. In the Russian Federation, the bulk of the electricity is generated at

large power plants and transmitted through power lines. 60–70% of the country's territory lacks a centralized power supply, where more than 20 million people live, and the development of small and micro-energy facilities is necessary.

Using a synchronous electric reciprocating machine with permanent magnets in power plants of a modular type makes it possible to rationally design an autonomous power supply source, to obtain the most optimal design.

The development of methodological design decisions and the optimization of engine design parameters as part of generating and drive complexes is an important scientific task.

A mathematical description of thermodynamic processes in a free-piston internal combustion engine, electromechanical and thermal processes occurring in a synchronous electric reciprocating machine with permanent magnets is developed, which is a necessary condition for designing and optimizing the design of an autonomous electric power complex.

According to theoretical calculations, in the Matlab application, on the basis of the additional Simulink module, a simulation model of a free-piston internal combustion engine, linear current load calculation units, stator magnetic induction, magnetic induction created by permanent inductor magnets, electromagnetic force were developed and calculated.

The created procedure for calculating the parameters of the electromagnetic component of the force of a synchronous machine with permanent magnets allows you to calculate and optimize the design parameters of the inductor and stator element of the electric motor under consideration. Thus, this will allow us to design electric machines with improved energy characteristics, due to the use of the obtained simulation results, which will allow us to use them more efficiently in the composition of generating and drive complexes.

**Keywords:** synchronous electric machine; simulation modeling; electromechanics; thermal model; small energy.

**For citation:** Safin AR, Ivshin IV, Gracheva EI, Petrov TI. Development of a mathematical model of an autonomous power supply source with a free piston motor on the basis of a synchronous electric returning machine with a permanent magnets. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):38-48. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-38-48.

## Введение

В Российской Федерации основная часть электроэнергии генерируется на крупных электростанциях и передается по линии электропередач. Одновременно с этим фактом, важно отметить, что на 60–70% территории страны отсутствует централизованное электроснабжение, где проживает свыше 20 млн. человек и необходимо развитие объектов энергетики, которые будут считаться автономными или объектами распределенной генерации. Такие объекты будут иметь несколько принципиальных различий от традиционных, наиболее важными характеристиками станут массогабаритные параметры.

Энергетическая стратегия РФ на этап до 2030 года обозначила совершенствование малой энергетики в качестве первостепенной задачи из множества приоритетных направлений модернизации энергетической системы, и на данный момент, в России уже в эксплуатации находится около 50 тыс. объектов «новой» энергетики.

Таким образом, приоритетом на ближайшее время является необходимость прирастить совместную мощность объектов малой энергетики (на несколько порядков) с целью увеличения параметров надежностей электроснабжения всех категорий приемников.

Одним из возможных вариантов является использование в качестве электромеханического преобразователя энергии в энергокомплексах синхронной электронной машины возвратно-поступательного воздействия с постоянными магнитами (ЭМВПД с ПМ), отличительным признаком которых является модульная конструкция.

Следовательно, принцип дает возможность изменять энергокомплекс под определенные параметры конечного приемника.

Работа электродвигателя вместе в едином корпусе с свободно-поршневым двигателем внутреннего сгорания (СПДВС) накладывает определенные лимиты по температурной среде, которая имеет потенциал достигать высоких значений температуры (150°C). Электрическое управление ходом индуктора синхронного двигателя и контроль положения индуктора дают возможность облегчить систему СПДВС и сделать лучше массогабаритные характеристики энергоустановки в целом.

Из выполненного обзора научной-технической литературы были сделаны следующие выводы, что на сегодняшний день, оптимальными с точки зрения регулирования рабочих

параметров (ток, напряжение) и наличия возможности получения переменного и постоянного электричества, считаются электромеханические генераторы (ЭМГ). Не считая этого, бесконтактные генераторы имеют более оптимальную конструкцию (с точки зрения массы, габаритов), высокие значения полезной мощности, а еще неплохую отработанность технологий изготовления [1].

Механический КПД ДВС с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ), находится в диапазоне 0,8–0,85, что гораздо ниже уровня СПДВС, который может достигать значения 0,93–0,95. Более простая конструкция СПДВС дает возможность значительно снизить расходы на изготовление, эксплуатацию и обслуживание автономной энергоустановки [2, 3].

СПДВС экономично работает на малых нагрузках, имеет достаточно высокий КПД (до 40 %), хорошие массо-габаритные параметры и большой ресурс работы (около 50000 ч) [4,5].

Стоит учитывать, что совокупное использование свободно-поршневого двигателя с синхронным двигателем дает потенциал развития из-за непрерывного изменения геометрической степени сжатия в двигателе.

Данный фактор позволит использовать двигатель на разных видах топливах, и оптимизировать расход топлива [6, 7].

Можно сделать вывод, что у данной технологии есть большие перспективы (электрические машины переменного тока), отличающиеся высокими значениями надежности, высочайшими динамическими свойствами, небольшими массогабаритными параметрами. Данные преимущества достигаются за счет особенностей СПДВС (максимальные нагрузки выше, по сравнению с другими машинами, эксплуатация и при сложных погодных условиях). И очевидно, что такие устройства обладают большим потенциалом внедрения в электроэнергетику [8, 9]. Из-за таких преимуществ синхронного двигателя с ПМ, как высокое значение  $\cos \phi$  и общий высокой полезной мощности, можно повышать энергоэффективность и ресурсосбережение производства, за счет снижения потерь в системе. Следовательно, повышается эффективность и всего энергокомплекса, если сравнивать с системами, на базе асинхронных двигателей. Показательным примером использования предлагаемой системы является установка синхронных двигателей для электроприводов, используемых в нефтяной отрасли (штанговые скважинные насосные установки).

Улучшение энергетических характеристик ЭМВПД с ПМ возможно на основе внедрения систем проектирования и оптимизации конструкции для чего необходимо математическое описание процессов, происходящих в автономной энергетической установке.

Важным фактором подтверждения актуальности работы является то, что существует прецедент существенной разницы между международной и отечественной науки в области совершенствования энергетических комплексов на основе СПДВС, которая выражается в фактическом отсутствии в пределах России значимых практических работ в данной тематике, и даже теоретических результатов. Таким образом работы для решения рассматриваемой проблематики могут привести к значимым научно-техническим итогам.

В работе предлагается современный метод проектирования и оптимизации СЭМПМ с использованием генетического алгоритма [10,11,12].

Разработан алгоритм анализа, многокритериальной и топологической оптимизации роторов и индукторов СЭМПМ. Предполагается, что ротор и индуктор с постоянными магнитами должен иметь несложную конструкцию для простоты изготовления и повышенный вращающий момент или линейную силу по сравнению с базовым образцом.

Проектирование электрической машины как эвристический процесс – не гарантирует нахождение лучшего решения. Необходимы методы дополняющие опыт и интуицию проектировщика для нахождения оптимального (рационального) решения. Топологическая оптимизация на данный момент выполняется с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для снижения массы и улучшения жесткостных характеристик конструкций. Предлагаемый метод позволяет перенести топологическую оптимизацию на электромагнитные процессы в СЭМПМ для определения направления намагниченности постоянных магнитов, размеров пазов статора и постоянных магнитов с целью повышения КПД и надежности электрической машины при заданных массо-габаритных показателях.

Таким образом, развитие методических решений проектирования и оптимизация конструктивных параметров СЭМПМ в составе генерирующих и приводных комплексов является важной научной задачей.

Созданная математическая модель и алгоритм расчета и выбора оптимальных характеристик синхронных двигателей имеют все шансы быть применены российскими проектными и научными организациями для оптимизации конструкции.

Для достижения поставленных результатов использовались методы оптимизации, теории электротехники, теории электрических машин, теории теплотехники. Исследования проводились с использованием сред математического моделирования *Matlab 2010*, *Comsol Multiphysics*, *Elcut*. Для проверки корректности математических моделей использовались методы имитационного моделирования и исследования на экспериментальных и испытательных стендах.

### Моделирование термодинамических процессов в СПДВС.

СПДВС стандартного цикла Отто рассматривается с использованием базовой модели двигателя для нахождения диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, а также резонансной частоты колебаний. Данная модель используется для определения влияния конфигурации и намагниченности постоянных магнитов синхронной ЭМВПД с ПМ на скорость колебаний в системе.

В рассматриваемом СПДВС два оппозитно-расположенных поршня установлены на общий шатун, что позволяет им колебаться между двумя крайними точками в цилиндрах.

Процесс горения топливной смеси происходит поочередно в каждом цилиндре, заставляя поршни совершать возвратно-поступательные движения. Рис. 1 иллюстрирует конфигурацию СПДВС.

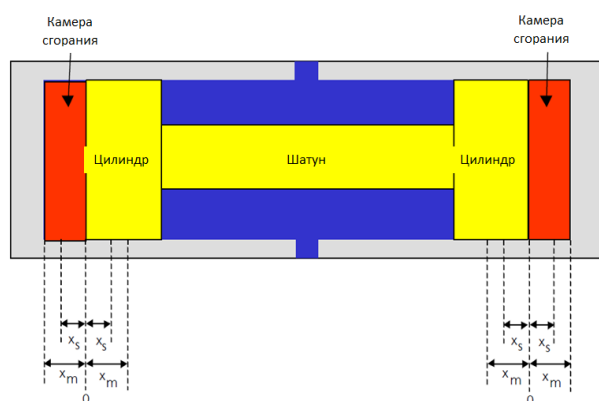


Рис.1. Упрощенный вид поперечного сечения СПДВС

На рис. 1 индуктор показан в нейтральном или в нулевом положении.

Как видно из рисунка, индуктор может свободно перемещаться на максимальное расстояние  $x_m$ , в любом направлении от нулевого положения до касания головки цилиндра. Однако, на практике индуктор движется только на расстояние  $x_s$  от нулевого положения, оставляя объем в цилиндре. Расстояние  $x_s$  равно длине половине хода индуктора (или, что тоже самое, поршня). По мере того, как поршневой узел перемещается в любом направлении, один цилиндр будет проходить процесс расширения, а другой сжатия, функционируя как нелинейная пружина. Сжатие и расширение каждого цилиндра моделируется как адиабатный процесс. В дальнейших расчетах резонансная частота вычисляется через сумму силы, действующей на поршни из-за давления газов при расширении и результирующей электромагнитной силы в генераторе переменного тока, равной произведению массы сборки поршня (сюда входит и масса индуктора) на ее ускорение (2 закон Ньютона).

Тогда уравнение баланса сил можно выразить через давление на входе топлива и степень сжатия (1).

$$A_B P_1 \left( \frac{2r}{r+1} \right)^n \left[ \left( 1 + \frac{x}{x_m} \right)^{-n} - \left( 1 - \frac{x}{x_m} \right)^{-n} \right] + \frac{Q_{in}(n-1)}{x_m - x_s} - F(x) = m x \quad (1)$$

где:  $A_B$  – площадь поперечного сечения цилиндра;  $m$  – масса индуктора (поршневой группы);  $x$  – положение индуктора (позиция);  $F(x)$  – электромагнитная сила и сила трения;  $n$  – политропный коэффициент сжатия;  $r$  – степень сжатия;  $Q_{in}$  – теплота сгорания топлива.

Решение данного уравнения позволяет определить положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора СПДВС, работающего в стационарных условиях.

Основными параметрами двигателей, на основе которых можно рассчитать возможность распределения и эксплуатации элементов из разных материалов,

массогабаритные параметры при известном значении мощности, будут следующие параметры [13]:

1. Магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_{\square}$ .

2. Линейная токовая нагрузка  $A$ .

Для того чтобы отобразить линейную токовую нагрузку в виде уравнения представим его в виде ряда Фурье (распределение линейной токовой нагрузки представляет собой нечетную функцию).

Получим следующее выражение (2)

$$A(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\omega_n i_{n2}}{b_N} \cdot \sum_{v=0}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{2v+1} \cdot \cos\left((2v+1)\pi\left(\frac{1}{2} - \frac{b_N}{2\tau_s}\right)\right) \\ & \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x)\right)\right) \\ & + \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x) - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ & + \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_s}(x) + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{aligned} \right] \quad (2)$$

где:  $b_N$  – ширина паза для обмотки;  $\tau_s$  – полюсное деление статора;  $v$  – номер гармоники;  $\omega_n$  – количество витков обмотки;  $i_{n2}$  – ток в обмотке.

Данный подход, аналогичный расчету линейной токовой нагрузки, позволяет получить следующее выражения для индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами  $B_{\text{mag}}(x)$  (3):

$$B_{\text{mag}}(x) = B_0 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{v=1}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{2v+1} \cdot \cos\left((2v+1)\pi\left(\frac{1}{2} - \frac{b_m}{2\tau_s}\right)\right) \\ & \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_{pm}}(x)\right)\right) \end{aligned} \right], \quad (3)$$

где:  $b_m$  – ширина магнита;  $\tau_{pm}$  – полюсное деление индуктора;  $B_0$  – остаточная намагниченность.

Складывая индукции воздушного зазора статора и индуктора, получаем результирующее значение индукции в воздушном зазоре (4):

$$\begin{aligned} B_{\text{рез}}(x, t) &= B_{\text{mag}}(x) + B_s(x, t) = \\ &= B_0 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{2v+1} \cdot \cos\left((2v+1)\pi\left(\frac{1}{2} - \frac{b_m}{2\tau_s}\right)\right) \\ & \sin\left((2v+1)\left(\frac{\pi}{\tau_{pm}}(x)\right)\right) \end{aligned} \right] + \\ &+ \frac{\sqrt{2} \cdot 3 \cdot \mu_0 \cdot \omega_n \cdot I}{\delta \cdot \pi} \cdot \sum_{v_D=0}^{\pm\infty} \frac{\xi_n \cdot \xi_s}{v_D} \cdot \cos\left(v_D \frac{\pi}{\tau_s} x - \omega t\right). \end{aligned}$$

Электромагнитная сила линейной машины рассчитывается как:

$$F_x(x, t) = 2pl_{sp} \int_0^{\tau_s} A(x, t) \cdot B_{\text{рез}}(x) dx,$$

где:  $p$  – число пар полюсов;  $l_{sp}$  – длина воздушного зазора.

Важно рассчитать не только параметры электромагнитной силы, но и характеристики тепловых процессов, для этого необходимо использовать тепловую модель синхронной электрической машины возвратно-поступательного действия.

Задачи моделирования теплового режима синхронной ЭМВПД с ПМ:

- создать как можно более точную картину тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ;
- определить максимально допустимую потребляемую и выдаваемую мощность ОЭМВПД при температуре охлаждающей жидкости (вода) от 25 °С до 80 °С;
- определить параметры, влияющие на теплоотдачу;
- определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

Определение теплопередачи и теплопроводности элементов синхронной ЭМВПД с ПМ основано на разбиении поперечного сечения синхронной ЭМВПД с ПМ, представленного на рис. 2.

|    |    |    |
|----|----|----|
| 22 | 23 | 24 |
| 19 | 20 | 21 |
| 16 | 17 | 18 |
| 13 | 14 | 15 |
| 10 | 11 | 12 |
| 7  | 8  | 9  |
| 4  | 5  | 6  |
| 1  | 2  | 3  |
| L1 | L2 | L3 |

Рис. 2. Разбиение поперечного сечения синхронной ЭМВПД с ПМ на области с соответствующими номерами

Области 2, 5 и 8 относятся к катушке с обмоткой, области L1, L2 и L3 относятся к индуктору синхронной ЭМВПД, области 22, 23, 24 – канал охлаждения, области 16-21 – кожух охлаждения, остальные относятся к пакету статора.

#### Результаты моделирования

Согласно теоретическим выкладкам в приложении *Matlab Simulink* разработана имитационная модель СПДВС, которая позволяет моделировать различные режимы работы СПДВС при варьировании входных параметров: давление газов при сгорании топлива, площадь поперечного сечения цилиндра, масса поршневой группы, положение индуктора.

Данные параметры позволяют решить уравнения (1), что дает возможность определить положение и скорость поршневой группы (и соответственно индуктора) СПДВС работающего в стационарных условиях.

Варьируемые параметры загружаются в имитационную модель СПДВС для последующего расчета и анализа.

Выходными параметрами являются:

$x$  – достигнутый максимальный ход индуктора;  $v$  – достигнутая максимальная скорость индуктора;  $P_{\text{мех}}$  – выходная механическая мощность средняя;  $f$  – частота колебаний индуктора.

Выходные параметры используются для дальнейших расчетов в различных блоках и программах при проектировании автономной энергоустановки.

Результаты моделирования представлены на рис. 3-4.

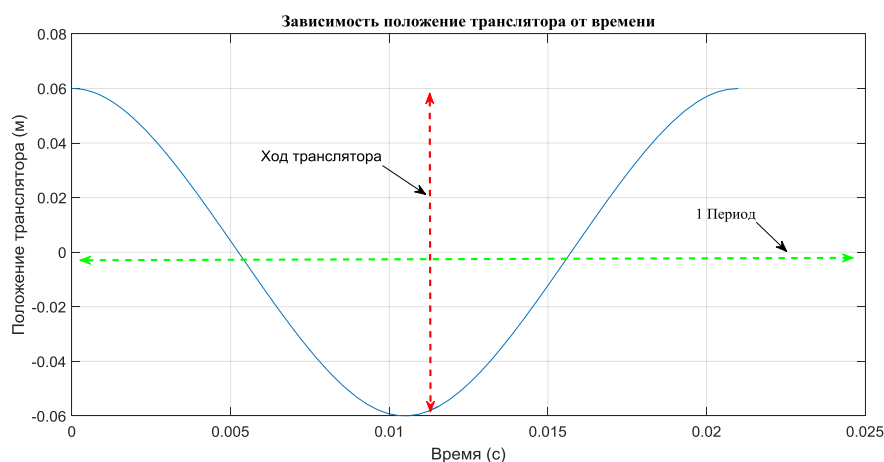


Рис. 3. Зависимость положения индуктора от времени в пределах одного цикла

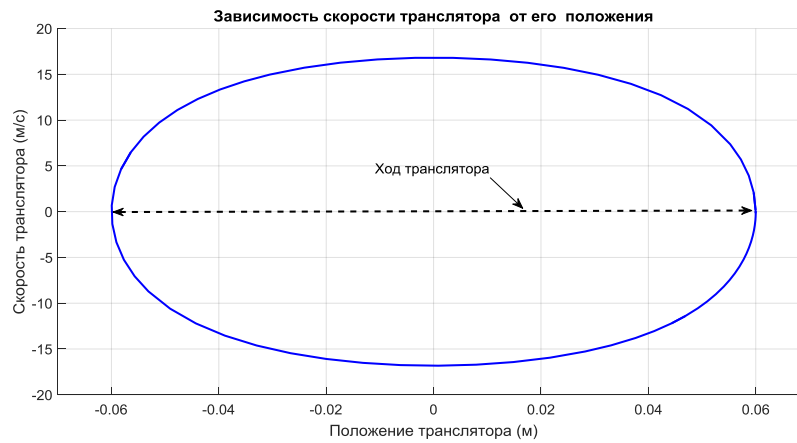


Рис. 4. Зависимость скорости и положения индуктора от времени в пределах одного цикла

### Выводы

Разработаны блоки расчета линейной токовой нагрузки, магнитной индукции статора, магнитной индукции, создаваемой постоянными магнитами индуктора, электромагнитной силы линейной машины, потерь в линейной электрической машине согласно теоретическим выкладкам, и на основе моделирования при помощи этих блоков получены следующие результаты (рис. 5-7).

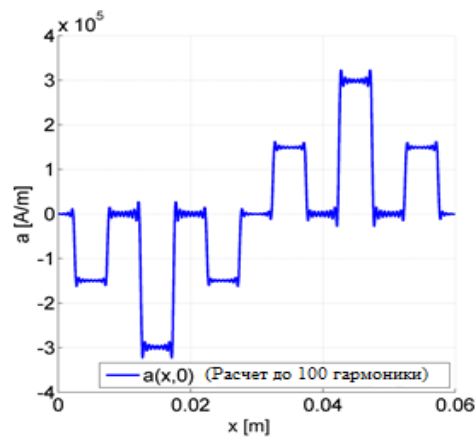


Рис.5. Нагрузка электрической машины

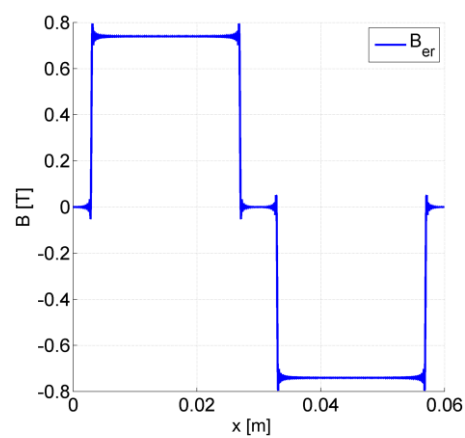


Рис. 6. Параметры поля возбуждения

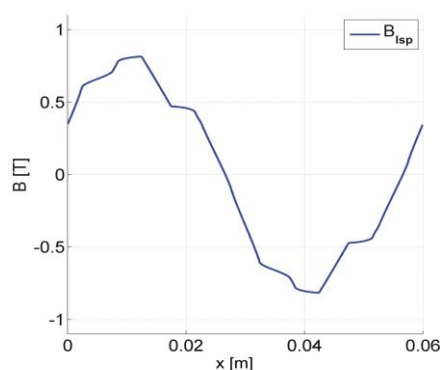


Рис. 7. Результирующее значение индукции

Реакция якоря (рис. 8) рассчитывается на основе метода конечных элементов с магнитными свойствами постоянных магнитов  $\mu_r = 1$  и  $B_r = 0$ , что позволяет моделировать расчет магнитного потока с тем условием, что постоянные магниты будут учитываться с параметрами воздушного зазора.

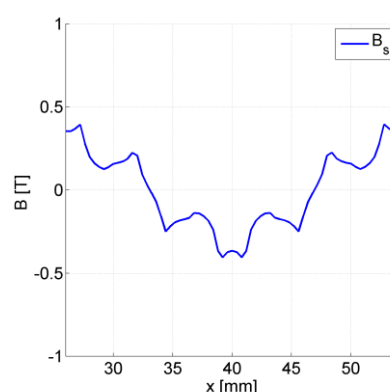


Рис.8. Реакция якоря в воздушном зазоре в границах полюсного деления

Составляющая магнитной индукции индуктора в индукции воздушного зазора образуется полем магнитов без учета влияния токов статора (реакции статора). Для этого в модели указывается плотность тока  $s = 0 \text{ A/mm}^2$ . Получаем поле возбуждения в границах полюсного деления, представленное на рис. 9, из которого можно получить представление о параметрах магнитной индукции ПМ, и еще сделаем вывод, что в данном случае статорная обмотка сильно влияет на рассматриваемое поле.

Достаточно качественным способом моделирования процессов изменения тепловых характеристик электрических машин, базирующихся на применении электросхем замещения термических изменений. Базой для применения рассматриваемых способов считается теоретические аспекты схожести и изоморфизма систем уравнений. При помощи данной системы можно представить все необходимые процессы, происходящие в электросистеме [14].

Электрическая схема замещения тепловой цепи синхронной ЭМВПД с ПМ, разработанная в программе *Matlab*, в специальном дополнительном пакете *Simulink*, с использованием готовых и расчетных блоков. На основе моделирования процессов в системе мы получили следующие данные, представленные на рис.10.



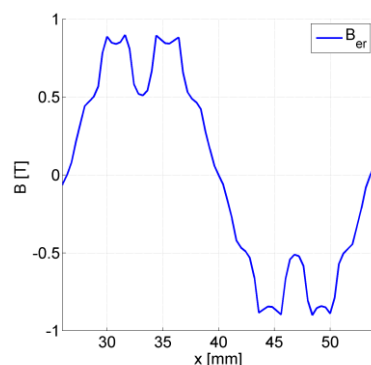


Рис.9. Поле возбуждения в границах полюсного деления

Наиболее часто применяется данная методика для расчетов в сфере определения тепловых характеристик двигателей [15].

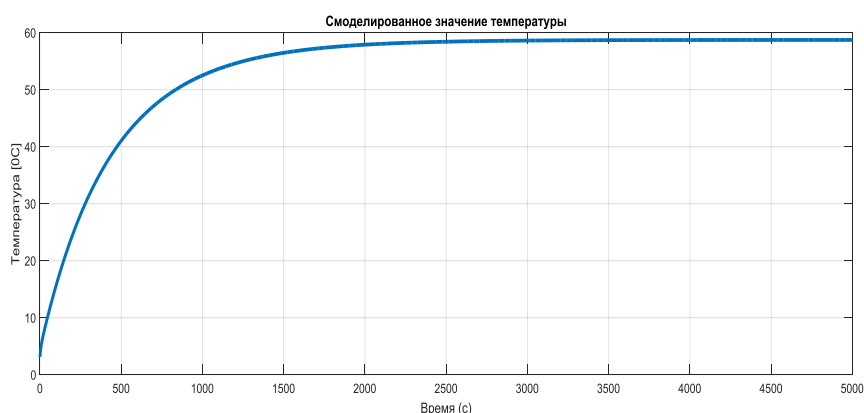


Рис. 10. Смоделированное значение температуры

Представленные итоги моделирования подтверждаются правильной постановкой цели статьи, работой с использованием передовых компьютерных программ, вспомогательной аппаратуры, всеохватывающим планом исследований, результаты теоретической и практической части сходятся, результаты соответствуют основным положениям исследователей в данной области, не выходят за пределы теоретических максимумов. Полученные результаты подверглись математическому анализу.

#### Заключение

Разработанная математическая модель работы свободнопоршневого двигателя (СПДВС) стандартного цикла Отто с учетом диаметра цилиндров, массы поршневой группы и индуктора, степени сжатия, хода поршня, теплоты сгорания топлива и сил трения позволяет составить уравнение баланса сил, что дает возможность рассчитать положение и скорость поршневой группы и, соответственно, индуктора синхронной ЭМВПД с ПМ, работающей в стационарных условиях автономной энергоустановки.

Разработанная методика расчета электромагнитной силы синхронной ЭМВПД с ПМ через отображение уравнения линейной токовой нагрузки и индукции магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, в виде ряда Фурье позволяет провести расчет и оптимизацию конструктивных параметров индуктора и статора электрической машины возвратно-поступательного действия.

Тепловая модель синхронной ЭМВПД с ПМ дает возможность создать как можно более точную картину тепловых процессов в синхронной ЭМВПД с ПМ, определить максимально допустимую выдаваемую мощность синхронной ЭМВПД с ПМ, определить параметры, влияющие на теплоотдачу, определить меры по тепловой защите синхронной ЭМВПД с ПМ.

Таким образом, это позволит конструировать ЭМВПД с улучшенными энергетическими характеристиками, за счет использования полученных результатов моделирования, что позволит использовать их более эффективно в составе генерирующих и приводных комплексов.

### Литература

1. Григораш ОВ., Божко СВ., Попов АЮ., и др. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы. Монография: Краснодар. 2012. 174 с.
2. Баль ВБ., Геча ВЯ., Гончаров ВИ., и др. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия – типы и конструкции электрических машин // Вопросы электромеханики. 2015. Т. 148. С. 3.
3. Сокол ЛБ. Линейные электродвигатели. Общий обзор // Технологии инженерных и информационных систем. 2016. № 4. С. 49.
4. Ferrari C., Friedrich E. Development of a Free-Piston Linear Generator for use in an Extended-Range Electric Vehicle // EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Los Angeles, California. 2012. P. 787.
5. Копылов АМ., Ившин ИВ., Денисова НВ., и др. Перспективы применения линейного двигателя-генератора для повышения энергоэффективности гибридного транспорта // «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Кемерово, 2014.
6. Сафин АР., Хуснутдинов РР., Копылов АМ., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник КГЭУ, 2018, №4 (40).
7. Gracheva EI., Alimova AN. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2019 pp. 361-367.
8. Noguchi, S., Matsutomo S. Rational Design Optimization Method for Reducing Cost and Improving Performance of Commonalized IPM Motor // IEEE Transactions on Magnetics. 2015. №51. P. 735.
9. Gargov NP., Zobaa AF., Pisica I. Separated magnet yoke for permanent magnet linear generator for marine wave energy converters // Electric Power Systems Research. 2014. № 109. P. 63.
10. Антипов ВН., Грозов АД., Иванова АВ. Линейный синхронный генератор мощностью 30 кВт для волновой энергетики // Электротехника. 2017. № 2. С. 8.
11. Song, Y., Feng H., Zuo Z., et.al. Comparison Research on Different Injection Control Strategy of CI Free Piston Linear Generator in One-time Starting Process // Energy Procedia. 2014. № 61. P. 1597.
12. Lei G., Liu C.C., Guo Y.G., et.al. Multidisciplinary Design Analysis for PM Motors with Soft Magnetic Composite Cores. IEEE Transactions on Magnetics. 2015. № 51. P.321.
13. Huang Z., Fang J. Multiphysics Design and Optimization of High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines for Air Blower Applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. № 63. P. 2766.
14. Sun X., Shi Z., Chen L. Internal model control for a bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system method. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2016. № 31. P.1539.
15. Shenoy KL., Kumar MS. Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor. ICEEOT. 2016. P. 1541.

### Авторы публикации

**Ившин Игорь Владимирович** – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Сафин Альфред Робертович** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Грачева Елена Ивановна** – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

**Петров Тимур Игоревич** – ассистент, Казанский государственный энергетический университет.

### References

1. Grigorash OV, Bozhko SV, Popov AYU, et al. *Autonomous sources of electricity: state and prospect*. Krasnodar, 2012. 174 p.
2. Bal VB, Getcha VYa, Goncharov VI., et al. Linear electric machines of reciprocating action - types and designs of electric machines. *Problems of Electromechanics*. 2015;148:3.

3. Sokol LB. Linear electric motors. General review. *Technologies of engineering and information systems*. 2016;4:49.
4. Ferrari C, Friedrich E. Development of a Free-Piston Linear Generator for use in an Extended-Range Electric Vehicle. *EVS26 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Los Angeles, California. 2012. P. 787.
5. Kopylov AM, Ivshin IV, Denisova NV. Prospects for the use of a linear engine-generator to improve the energy efficiency of hybrid vehicle. *Energy and Energy Saving: Theory and Practice*. Kemerovo. 2014.
6. Safin AR, Khusnutdinov RR., Kopylov AM., et al. Development of a method for topological optimization of the preparation of coffee based on the genetic algorithm. *Bulletin of KSPEU*. 2018;4(40).
7. Gracheva EI, Alimova AN. Calculating Methods and Comparative Analysis of Losses of Active and Electric Energy in Low Voltage Devices. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2019. pp. 361-367.
8. Noguchi S, Matsutomo S. Rational Design Optimization Method for Reducing Cost and Improving Performance of Commonalized IPM Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015;51:735.
9. Gargov NP, Zobaa AF, Pisica I. Separated magnet yoke for permanent magnet linear generator for marine wave energy converters. *Electric Power Systems Research*. 2014;109:63.
10. Antipov VN, Grozov AD, Ivanova AV. 30 kW linear synchronous generator for wave energy. *Electrical Engineering*. 2017;2:8.
11. Song Y, Feng H, Zuo Z, et.al. Comparison Research on Different Injection Control Strategy of CI Free Piston Linear Generator in One-time Starting Process. *Energy Procedia*. 2014;61:1597.
12. Lei G, Liu CC, Guo YG, et.al. Multidisciplinary Design Analysis for PM Motors with Soft Magnetic Composite Cores. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2015;51:321.
13. Huang Z, Fang J. Multiphysics Design and Optimization of High-Speed Permanent-Magnet Electrical Machines for Air Blower Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016;63:2766.
14. Sun X, Shi Z, Chen L. Internal model control for a bearingless permanent magnet synchronous motor based on inverse system method. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2016;31:1539.
15. Shenoy KL, Kumar MS. *Design topology and electromagnetic field analysis of Permanent Magnet Brushless DC motor*. ICEEOT. 2016. P. 1541.

#### **Authors of the publication**

**Igor V. Ivshin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Alfred R. Safin** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: sarkazan@bk.ru.

**Elena I. Gracheva** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Timur I. Petrov** – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

**Поступила в редакцию**

**24 октября 2019г**