

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.313

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-83-96>

Поступила в редакцию 08.01.2020

Received 08.01.2020

**А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин***Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь***ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ «СВОБОДНОПОРШНЕВОЙ  
ДВИГАТЕЛЬ – ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА БАЗЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ»**

**Аннотация.** В ходе анализа состояния и перспектив развития автономных источников электрической энергии с электрическими генераторами возвратно-поступательного движения установлено, что в настоящее время широко распространены маломощные системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения». Проведенные исследования электрических генераторов возвратно-поступательного движения показали, что особого внимания заслуживают комбинированные генераторы, которые способны повысить эффективность такой системы. Однако до настоящего времени изучению системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения» не уделялось должного внимания. В связи с этим была разработана имитационная модель системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения», позволяющая проводить исследования данной системы в различных режимах работы при изменении параметров электрической и механической подсистем. Отличительной особенностью разработанной имитационной модели является учет особенностей одновременного использования в магнитной системе электрического генератора возвратно-поступательного движения поперечного и продольного нелинейного изменения магнитных потоков. В результате проведенных исследований имитационной модели показано, что комбинированный электрический генератор возвратно-поступательного движения позволяет обеспечить непрерывное преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию на всем рабочем цикле, а также скомпенсировать рассогласование сил электрической и механической подсистем системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения».

**Ключевые слова:** электромеханотронный преобразователь энергии возвратно-поступательного движения, электромеханотронный преобразователь, имитационная модель, электрический генератор возвратно-поступательного движения, свободнопоршневой двигатель

**Для цитирования:** Менжинский, А. Б. Имитационная модель «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения» / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 83–96. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-83-96>

**Andrei B. Menzhinsky, Andrey N. Malashin***Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus***SIMULATION MODEL “FREE-PISTON ENGINE – ELECTROMECHANOTRONIC CONVERTER ON THE BASIS  
OF AN ELECTRICAL GENERATOR RECIPROCATING”**

**Abstract.** The analysis of the state and prospects of development of autonomous electric power sources with electric reciprocating motion generators has shown that at present, low-power systems “free-piston engine – electromechatron converter based on an electric reciprocating motion generator” are widely used. Studies of electric reciprocating generators have shown that special attention should be paid to combined generators that can improve the efficiency of such a system. However, until now, the study of the system “free-piston engine – electromechatron converter based on a combined electric reciprocating generator” has not been given due attention. In this regard, a simulation model of the system “free-piston engine – electromechatron converter based on an electric generator of reciprocating motion” was developed, which allows conducting research of this system in various operating modes when changing the parameters of the electrical and mechanical subsystems. A distinctive feature of the developed simulation model is the consideration of the features of simultaneous use in the magnetic system of an electric generator of reciprocating motion of transverse and longitudinal nonlinear changes in magnetic flows. As a result of the simulation model studies, it is shown that the combined electric generator of reciprocating motion allows for continuous conversion of mechanical energy of reciprocating motion into electricity over the entire operating cycle, as well as – to compensate for the mismatch of the forces of the electrical and mechanical subsystems of the system “free-piston engine – electromechatron converter based on an electric generator of reciprocating motion”.

**Keywords:** electromechanical converter of reciprocating motion energy, electromechanotron converter, simulation model, electric generator of reciprocating motion, free-piston engine

**For citation:** Menzhinsky A.B., Malashin A.N. Simulation model “free-piston engine – electromechatronic converter on the basis of an electrical generator reciprocating”. *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 83–96 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-83-96>

**Введение.** Большинство маломощных автономных источников электрической энергии (АИЭЭ) входящих в состав автономной системы электроснабжения (АСЭС), строятся по традиционной схеме на базе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) и электрической машины вращательного типа [1, 2]. Основными недостатками такого типа АИЭЭ являются: относительно большие массогабаритные показатели; низкие удельные показатели; высокий уровень шума; затруднительный пуск при отрицательных температурах; недопустимость работы с нагрузкой менее 20–40 %; высокий удельный расход топлива; сравнительно малый ресурс работы; относительно невысокий коэффициент полезного действия (КПД) [1].

Кроме того, на процесс создания новых видов АИЭЭ в последнее время все большее влияние оказывает складывающаяся в мире экологическая обстановка, которая заставляет ученых искать пути повышения экономичности и экологической чистоты механического привода АИЭЭ как одного из основных загрязнителей атмосферы.

В связи с этим в промышленно развитых странах (Россия, США, Великобритания, Япония, Германия, Швеция, Нидерланды, Китай, Израиль и др.) в качестве перспективного АИЭЭ рассматривается система «свободнопоршневой двигатель (СПД) – электромеханотронный преобразователь (ЭМТП) [3] на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения (ЭГВПД)» [4–6].

В течение 5–10 лет в Республике Беларусь также необходимо осуществить переход с дизель-генераторных силовых установок вращательного действия на свободнопоршневые дизель-генераторные установки на альтернативных экологически чистых видах топлива [7]. Это, в свою очередь, требует развития теории электромеханики применительно к ЭМПЭ возвратно-поступательного движения, которые повысили бы эффективность системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД».

Проведенные в [8] исследования разработанных авторами данной статьи структур ЭГВПД показали, что особого внимания заслуживают комбинированные ЭГВПД с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока, которые способны повысить эффективность системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД». Однако до настоящего времени исследованию данной системы с комбинированным (поперечным и продольным) нелинейным изменением магнитного потока не уделялось должного внимания.

Таким образом, разработка имитационной модели (ИМ) системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» с целью ее исследования в различных режимах работы представляет особую актуальность.

**Структура разработанного комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения.** Вариант структуры разработанного авторами настоящей статьи комбинированного ЭГВПД представлен на рис. 1<sup>1</sup>.

Комбинированный ЭГВПД содержит:

неподвижные С-образный магнитопровод 1 и Н-образный магнитопровод 2, набранные из листов электротехнической стали с общим стержнем 3, на котором размещена генераторная обмотка 4;

два подвижных П-образных магнитопровода 5, 6, набранных из листов электротехнической стали;

девять постоянных магнитов 7.1–7.4, 8.1, 8.2, 9.1–9.3;

два стержня 10.1, 10.2, изготовленных из листов электротехнической стали;

четыре изолирующих каркаса 11.1–11.4.

<sup>1</sup> Комбинированный генератор возвратно-поступательного типа: пат. 12237U Респ. Беларусь. МПК Н 02К 35/00 (2006.01)/ А. Б. Менжинский, Ю. В. Суходолов, А. Н. Малашин, А. Е. Каледа, П. Б. Менжинский ; дата публ.: 28.02.2020.

На изолирующих каркасах 11.1 и 11.2 закреплены два подвижных П-образных магнитопровода 5, 6 с постоянными магнитами 7.1–7.4 на каждом стержне 5.1, 5.2, 6.1, 6.2 соответственно, где постоянные магниты 7.1 и 7.3, 7.2 и 7.4 разделены воздушными зазорами между торцами стержней 5.1–2.1, 5.2–2.2, 6.1–2.3, 6.2–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 и двух подвижных П-образных магнитопроводов 5, 6 и обращены друг к другу разноименными полюсами, причем оси постоянных магнитов 7.1–7.4 совпадают с осями стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2. Два постоянных магнита 8.1, 8.2 с чередующейся полярностью расположены в воздушном зазоре между торцами стержней 1.1, 1.2 неподвижного С-образного магнитопровода 1. Оси постоянных магнитов 8.1, 8.2 параллельны осям стержней 1.1, 1.2 неподвижного С-образного магнитопровода 1. Кроме того, на изолирующих каркасах 11.1, 11.2 закреплены стержни 10.1 и 10.2, изготовленные из листов электротехнической стали. На торцах этих стержней расположены постоянные магниты 9.1 и 9.3, между которыми с помощью изолирующих каркасов 11.3 и 11.4, закрепленных на общем стержне 3 неподвижных С-образного магнитопровода 1 и Н-образного магнитопровода 2, размещен постоянный магнит 9.2, причем постоянные магниты 9.1–9.3 расположены таким образом, что их полярности чередуются, а оси совпадают и параллельны осям стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2. При этом величина воздушного зазора между постоянными магнитами 9.1, 9.2 и 9.2, 9.3 равна величине воздушного зазора между торцами стержней 5.1, 5.2, 6.1, 6.2 подвижных П-образных магнитопроводов 5, 6 с постоянными магнитами 7.1–7.4 и торцами стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 соответственно.

Комбинированный ЭГВПД собран таким образом, что площадь сечения общего стержня 3 неподвижных С-образного магнитопровода 1 и Н-образного магнитопровода 2 равна суммарной площади сечений стержней 1.1, 2.1 неподвижного С-образного магнитопровода 1 и неподвижного Н-образного магнитопровода 2 соответственно. Возратно-поступательное движение подвижные П-образные магнитопроводы 5 и 6 совершают в одной плоскости, вдоль осей стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2.

Одной из особенностей разработанной структуры комбинированного ЭГВПД является то, что она позволяет скомпенсировать силы магнитного притяжения, действующие между постоянными магнитами 7.1–7.4 и стержнями 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 соответственно.

**Принцип работы комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения.** Постоянные магнитные потоки от постоянных магнитов 7.1–7.4 и 8.1, 8.2 замыкаются по магнитным цепям: «постоянный магнит 7.1 – воздушный зазор – стержень 2.1 – общий стержень 3 – стержень 2.2 – воздушный зазор – постоянный магнит 7.2 – стержень 5.2 – подвижный П-образный магнитопровод 5 – стержень 5.1 – постоянный магнит 7.1»; «постоянный

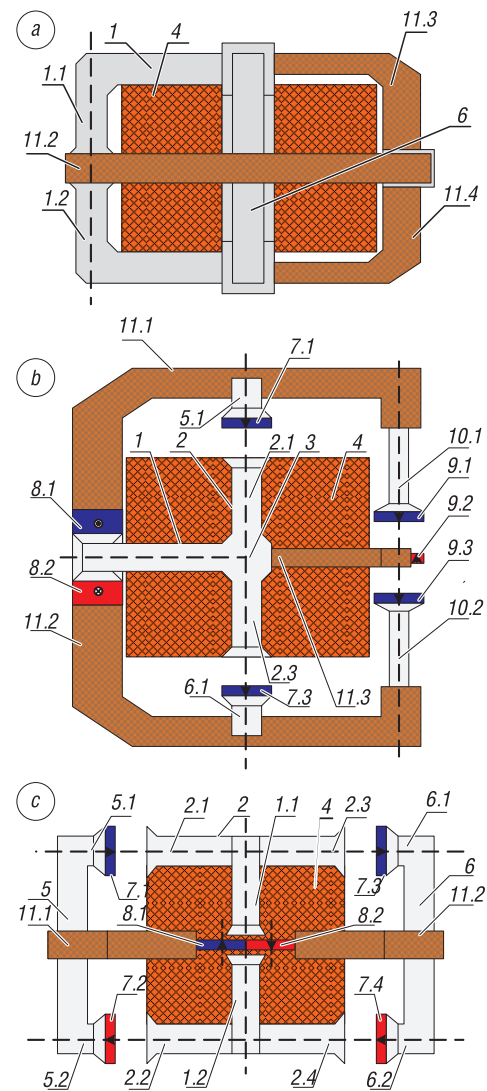


Рис. 1. Структура комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения: а – вид в плоскости  $Oyz$ ; б – вид в плоскости  $Oxy$ ; в – вид в плоскости  $Oxz$

Fig. 1. The combined structure of electrical generator reciprocating: а – form in the plane  $Oyz$ ; б – form in the plane  $Oxy$ ; в – form in the plane  $Oxz$

магнит 7.4 – воздушный зазор – стержень 2.4 – общий стержень 3 – стержень 2.3 – воздушный зазор – постоянный магнит 7.3 – стержень 6.1 – подвижный П-образный магнитопровод 6 – стержень 6.2 – постоянный магнит 7.4» и «постоянный магнит 8.1 (8.2) – воздушный зазор – стержень 1.1 (1.2) – общий стержень 3 – стержень 1.2 (1.1) – воздушный зазор – постоянный магнит 8.1 (8.2)», – соответственно и суммируются в общем стержне 3.

При совершении подвижными П-образными магнитопроводами 5 и 6 возвратно-поступательного движения вдоль осей стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 происходит изменение величины воздушных зазоров между торцами стержней 5.1–2.1, 5.2–2.2, 6.1–2.3, 6.2–2.4, а также площади сечения воздушного зазора между торцами стержней 1.1, 1.2 и постоянными магнитами 8.1, 8.2. Это вызывает изменение магнитных проводимостей следующих магнитных цепей: «постоянный магнит 7.1 – воздушный зазор – стержень 2.1 – общий стержень 3 – стержень 2.2 – воздушный зазор – постоянный магнит 7.2 – стержень 5.2 – подвижный П-образный магнитопровод 5 – стержень 5.1 – постоянный магнит 7.1»; «постоянный магнит 7.4 – воздушный зазор – стержень 2.4 – общий стержень 3 – стержень 2.3 – воздушный зазор – постоянный магнит 7.3 – стержень 6.1 – подвижный П-образный магнитопровод 6 – стержень 6.2 – постоянный магнит 7.4» и «постоянный магнит 8.1 (8.2) – воздушный зазор – стержень 1.1 (1.2) – общий стержень 3 – стержень 1.2 (1.1) – воздушный зазор – постоянный магнит 8.1 (8.2)». В то же время постоянные магниты 9.1–9.3 компенсируют силы магнитного притяжения, действующие между постоянными магнитами 7.1–7.4 и стержнями 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 соответственно.

Изменение магнитных проводимостей магнитных цепей вызывает продольное и поперечное изменения во времени постоянных магнитных потоков от постоянных магнитов 7.1–7.4 и 8.1, 8.2, замыкающихся по этим магнитным цепям. За счет того что продольно и поперечно изменяющиеся во времени постоянные магнитные потоки от указанных постоянных магнитов суммируются в общем стержне 3 неподвижных С-образного магнитопровода 1 и Н-образного магнитопровода 2, в общем стержне 3 формируется комбинированный магнитный поток. Изменяющийся во времени комбинированный магнитный поток, согласно закону Фарадея, наводит в генераторной обмотке 4 электродвижущую силу. При подключении нагрузки комбинированный ЭГВПД формирует равномерно действующую (распределенную на всем рабочем ходе более равномерно) электромагнитную силу (ЭМС) на подвижную часть генератора не только на середине рабочего хода, но и вблизи крайних точек рабочего хода комбинированного ЭГВПД.

**Разработка имитационной модели системы «свободнопоршневой двигатель – электро-механотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения».** При разработке ИМ были рассмотрены два режима работы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД». Первый режим работы – аварийный «Авария» (например, пропуск зажигания рабочей смеси и т. д.), в котором в крайних положениях поршневой группы не выполняются условия баланса сил механической (приводной двигатель) и электрической (ЭМТП на базе ЭГВПД) подсистем системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» и может произойти поломка [9]. Второй режим работы – основной «Работа» [10, 11], в котором выполняется условие баланса сил механической и электрической подсистем на всем рабочем цикле.

В режиме «Авария» система управления электрической подсистемы должна компенсировать силы электрической и механической подсистем в крайнем положении поршневой группы [9] и тем самым предотвращать поломку системы. В режиме «Работа» система управления электрической подсистемы должна выполнять следующие задачи [11]: эффективное преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию на всем рабочем цикле; поддержание стабильного режима работы системы (выполнение условия баланса (согласования) сил механической и электрической подсистем); обеспечение заданного движения поршня для реализации требуемой степени сжатия; поддержание заданной средней скорости поршневой группы.

Вопрос компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в крайних положениях поршневой группы в режиме «Авария» за счет управления ЭМС электрической подсистемы уже раскрыт в [12]. Поэтому целью настоящего исследования явилась разработка ИМ системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» при компенсации рассогласования сил электриче-



ской и механической подсистем в режиме «Работа» за счет управления ЭМС ЭГВПД с комбинированным нелинейным изменением магнитного потока. Проведенные теоретические исследования показали, что управление ЭМС ЭГВПД с комбинированным нелинейным изменением магнитного потока возможно реализовать при работе генератора с управляемым преобразователем (УП) на базе повышающего импульсного регулятора напряжения (ПИРН) [13].

С учетом задач систем управления в режимах «Авария» и «Работа» авторами разработана функциональная схема системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» (рис. 2).

Схема включает: СПД – свободнопоршневой двигатель; КГ (комбинированный генератор) – комбинированный ЭГВПД; БФЭМС – блок формирования ЭМС; БСС – блок сравнения сил механической и электрической подсистем; БККУН – блок коммутации контура управления напряжением; БФУВ – блок формирования управляющего воздействия, подробно рассмотрен в [12]; УП (НР) – управляемый преобразователь в режиме «Работа»; УП (АР) – управляемый преобразователь в режиме «Авария»; БКУП – блок коммутации УП; АКБ – аккумуляторные батареи;  $x_{п.г}$  – координата перемещения поршневой группы СПД;  $F^*$  – электромагнитная сила КГ;  $F_d$  – движущая сила СПД;  $F_{ЭМС.э}$  – заданное значение ЭМС от электрической подсистемы;  $F_{ЭМС.м}$  – заданное значение ЭМС от механической подсистемы;  $f$  – функция, характеризующая рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа»;  $\beta$  – сигнал отключения (подключения) контура управления напряжением;  $\lambda$  – функция, характеризующая рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Авария»;  $\delta$  – сигнал об аварийном режиме работы СПД;  $u$  – напряжение на зажимах рабочей обмотки КГ;  $i$  – ток в рабочей обмотке КГ.

Блоки БСС, БККУН, УП (НР) функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» задействованы только в режиме «Работа», блоки БФУВ, УП (АР), АКБ функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» – только в режиме «Авария» [12], блоки СПД, КГ, БФЭМС, БКУП функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» – в обоих режимах работы.

На основании функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» (см. рис. 2) разработана имитационная модель данной системы (рис. 3), которая включает в себя имитационные модели механической (СПД) и электрической подсистем.

Имитационная модель механической подсистемы представлена на рис. 4.

Имитационная модель электрической подсистемы включает в себя имитационные модели отдельных блоков электрической подсистемы (ЭМТП на базе ЭГВПД). Авторами разработаны ИМ блоков электрической подсистемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД», которые позволяют

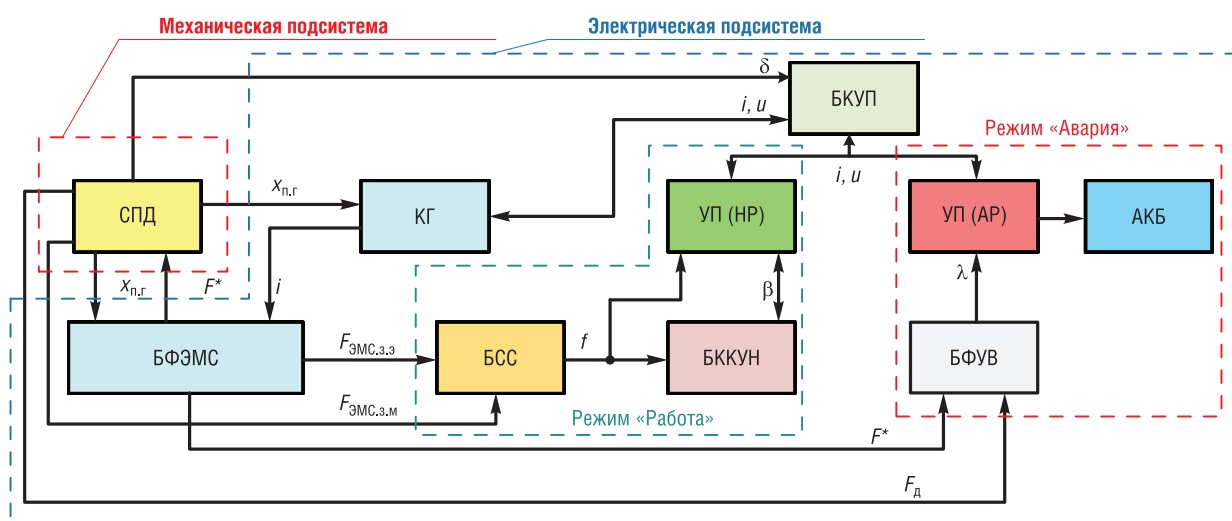


Рис. 2. Функциональная схема системы «свободнопоршневой двигатель – электромехатронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения»

Fig. 2. Functional diagram of the system of “free-piston engine – electromechatronic converter on the basis of an electrical generator reciprocating”

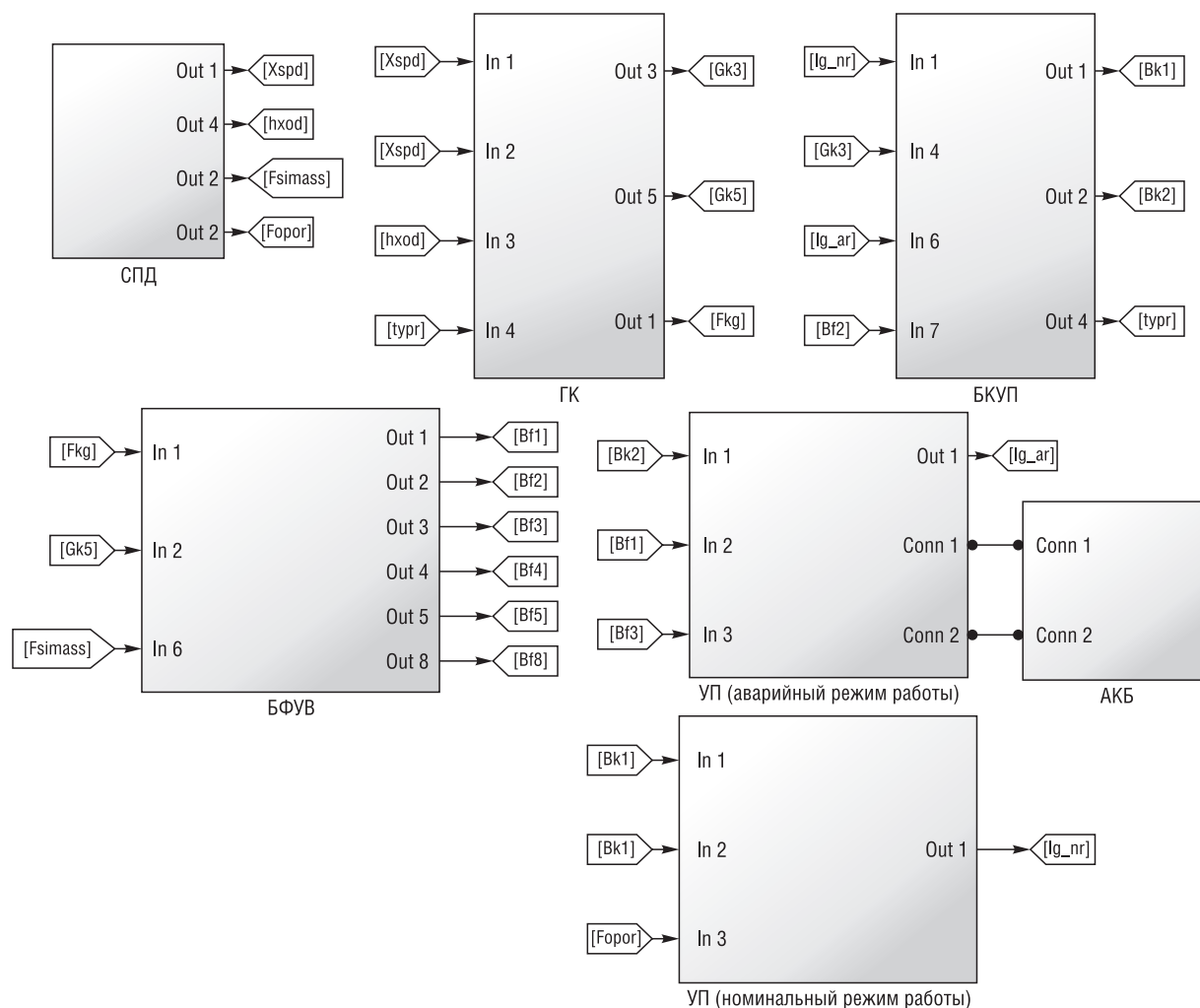


Рис 3. Имитационная модель системы «свободнопоршневой двигатель – электромехатронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения»

Fig. 3. Simulation model of the system “free-piston engine – electromechatronic converter on the basis of an electrical generator reciprocating”

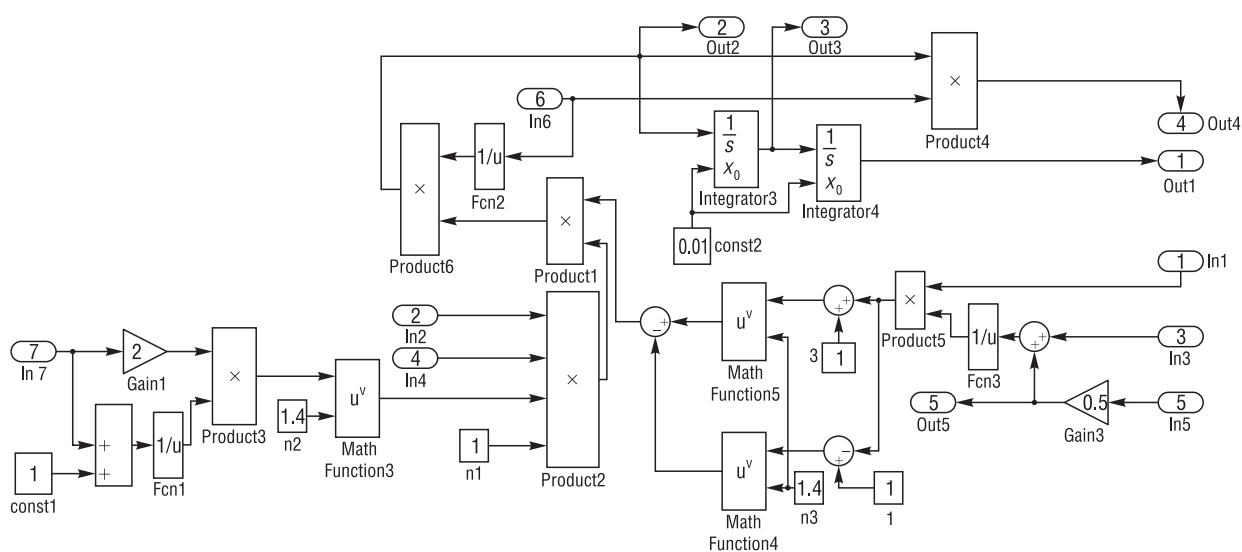


Рис. 4. Имитационная модель механической подсистемы

Fig. 4. Simulation model of the mechanical subsystem

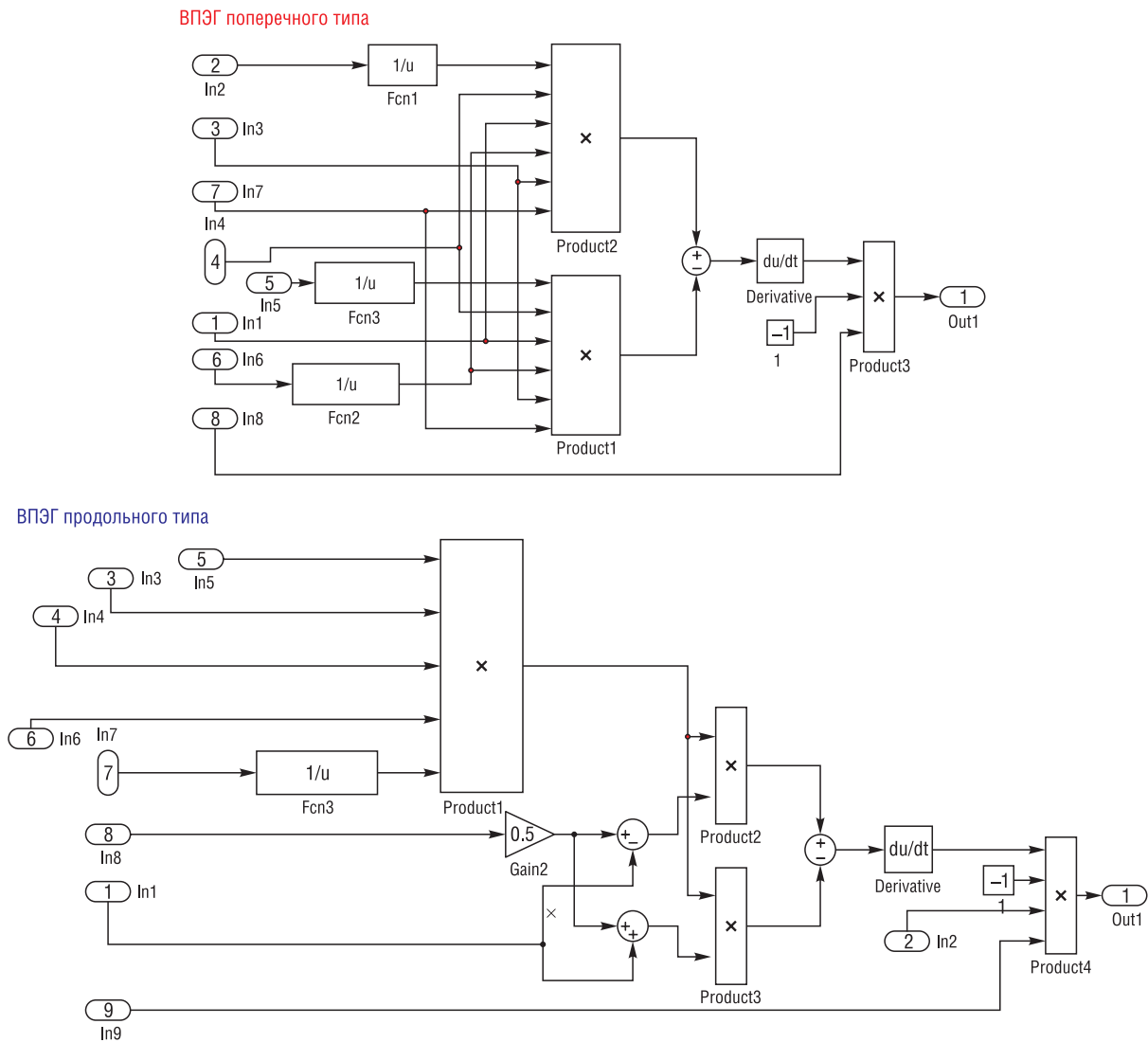


Рис. 5. Имитационная модель комбинированного генератора

Fig. 5. Simulation model of the combined generator

реализовать режим «Работа». Имитационные модели блоков КГ, БФЭМС электрической подсистемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» представлены на рис. 5, 6.

На рис. 7 представлена разработанная авторами функциональная схема системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа».

Схема замещения УП на базе ПИРН в режиме «Работа» (рис. 8) описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L di_L / dt = u - Ri_L - K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u}) u_c; \\ C du_c / dt = K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u}) i_L - u_c / R_H, \end{cases} \quad (1)$$

где  $K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u})$  – коммутационная функция в режиме «Работа»;  $\xi_{i,u}$  – разностная функция в режиме «Работа»;  $L$  – индуктивность дросселя;  $i_L$  – ток дросселя;  $u$  – выпрямленное переменное напряжение генератора на выходе выпрямителя;  $R$  – активное сопротивление, характеризующее потери в преобразователе;  $u_c$  – напряжение на емкости;  $c$  – емкость;  $R_H$  – активное сопротивление нагрузки.

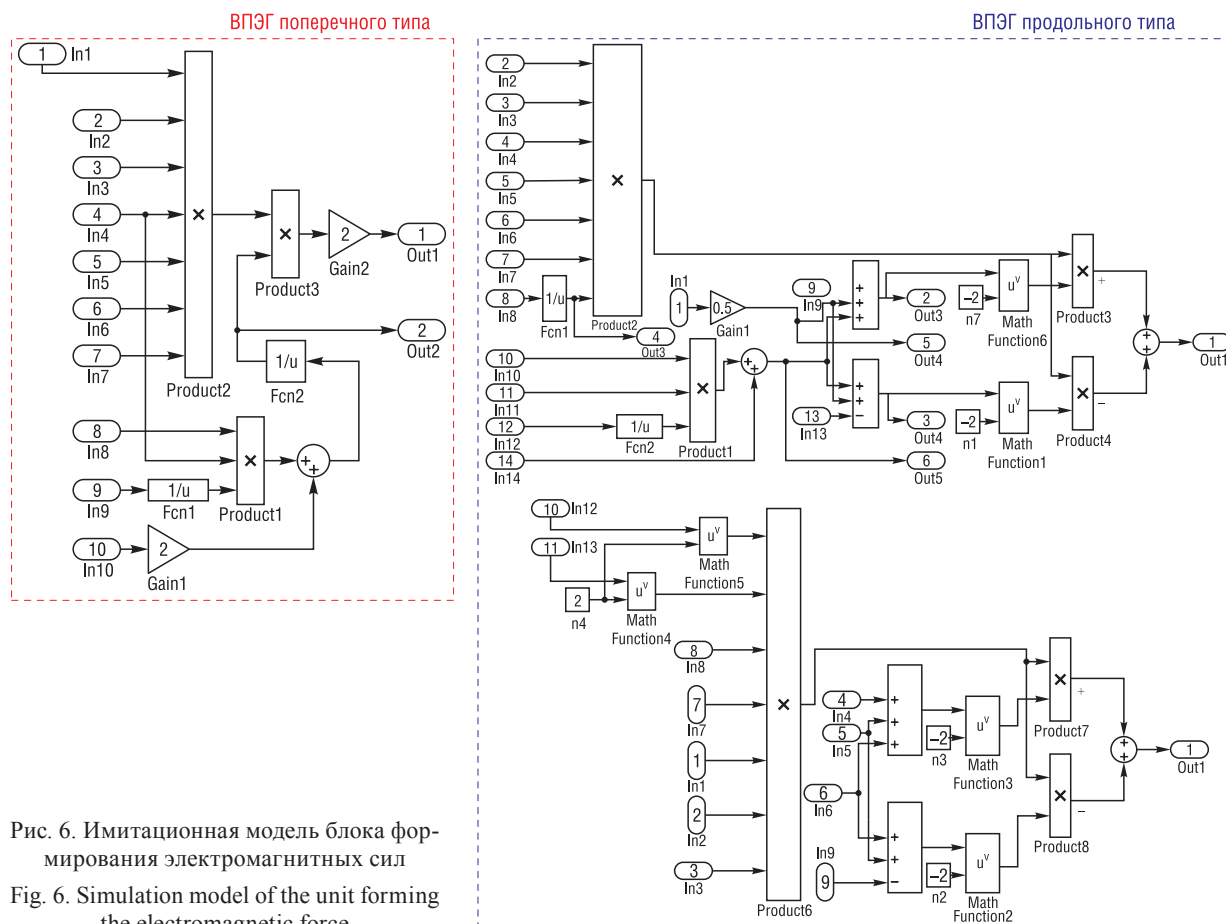


Рис. 6. Имитационная модель блока формирования электромагнитных сил

Fig. 6. Simulation model of the unit forming the electromagnetic force

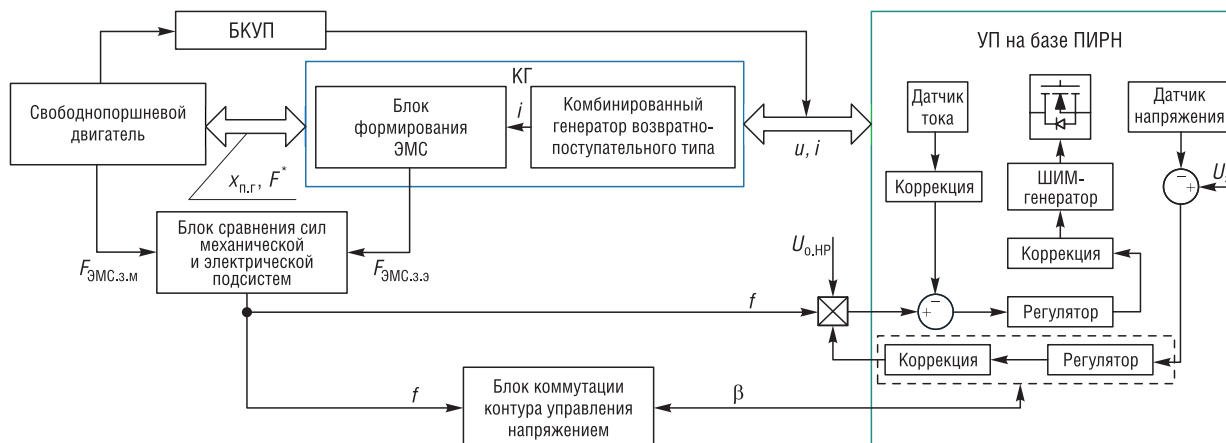


Рис. 7. Функциональная схема системы «свободнопоршневой двигатель – электромехатронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения» при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа»

Fig. 7. Functional diagram of the system “free-piston engine – electromechatron converter based on an electric generator of reciprocating motion” for compensation of misalignment of forces of electrical and mechanical subsystems in the “Work mode”

Согласно схеме замещения разностная функция  $\xi_{i,u}$  принимает вид

$$\xi_{i,u} = \begin{cases} \alpha_i \left( f U_{o,нр} | \alpha_u (U_3 - \beta_u U) |^2 - \beta_i i_L \right) & \text{при } \beta = 0, \text{ если } f \in [f_1; f_2]; \\ \alpha_i (f U_{o,нр} - \beta_i i_L) & \text{при } \beta = 1, \text{ если } f \notin [f_1; f_2], \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{o,нр}$  – опорный сигнал в режиме «Работа»;  $\alpha_u$  – коэффициент усиления ошибки по напряжению контура управления напряжением;  $U_3$  – заданное напряжение;  $\beta_u$  – коэффициент передачи



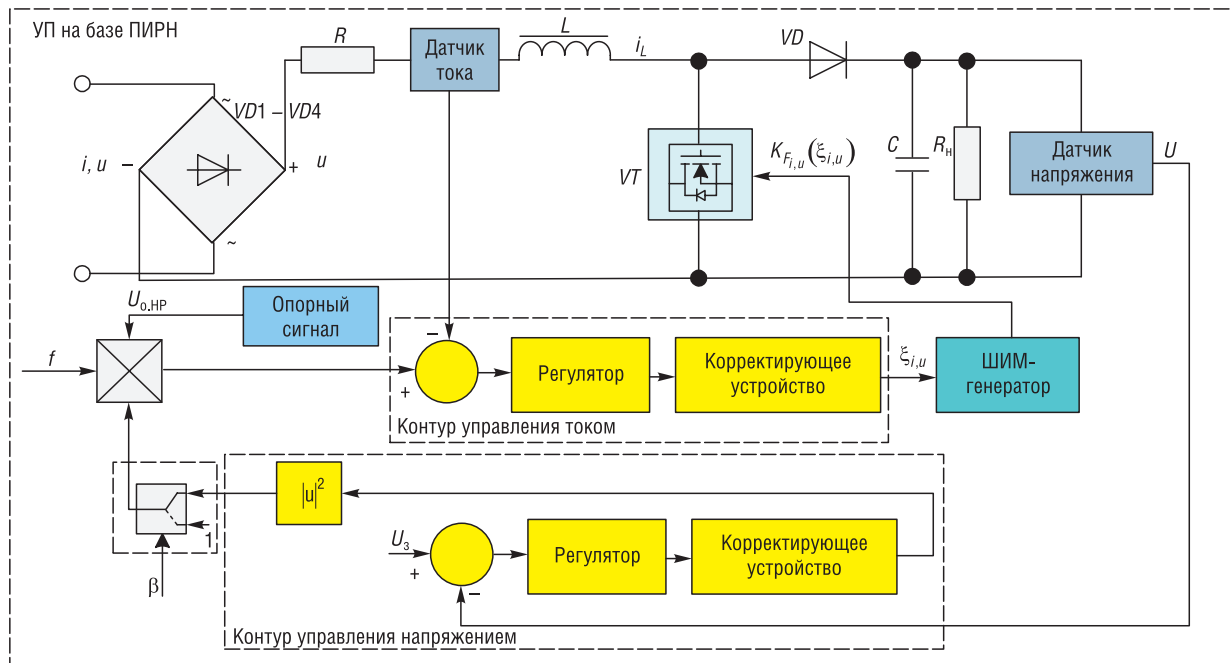


Рис. 8. Схема замещения управляемого преобразователя на базе повышающего импульсного регулятора напряжения в режиме «Работа»

Fig. 8. Replacement circuit of the controlled converter on the basis of an increasing pulse voltage regulator in the “Work mode”

датчика обратной связи выходного напряжения;  $f_1, f_2$  – заданные значения функции  $f$ ;  $\alpha_i$  – коэффициент усиления ошибки по току контура управления током;  $\beta_i$  – коэффициент передачи датчика обратной связи тока дросселя;  $U$  – напряжение на выходе датчика напряжения УП.

Коммутационная функция  $K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u})$  характеризует состояния ключа  $VT$  на каждом периоде широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и представляется выражением

$$K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u}) = \frac{1}{2}(1 + \text{sign}(\xi_{i,u})). \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что коммутационная функция принимает два значения – 0 и 1.

На основании функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» (см. рис. 7) в среде MatLab/Simulink разработаны ИМ УП (НР) с номинальной мощностью  $P_n = 1,1$  кВт и частотой коммутации ключа  $f_s = 51,2$  кГц, а также БККУН, БСС механической и электрической подсистем (рис. 9). Анализ передаточных функции УП на базе ПИРН показал, что работа УП возможна при коррекции его динамических свойств. Стабилизация усиления на низких частотах обеспечивается применением в контуре управления интегрирующего звена, а коррекция средних и высоких частот достигается введением в контур управления дифференцирующего звена первого порядка и апериодического звена.

Блок-схема алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» в режиме «Работа» представлена на рис. 10.

*Пояснение алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» в режиме «Работа».* В режиме «Работа» сигнал  $\delta = 0$  с выхода СПД поступает на вход БКУП, который подключает УП (НР) к выходу КГ. В БСС механической и электрической подсистем рассчитывается значение функции  $f$ , характеризующей рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа», на основании заданных значений ЭМС  $F_{\text{ЭМС.э}}$  и  $F_{\text{ЭМС.м}}$  от электрической и механической подсистем. Далее в БККУН осуществляется определение принадлежности  $f$  заданному интервалу  $[f_1, f_2]$ . Если  $f \in [f_1, f_2]$ , то формируется сигнал  $\beta = 0$ , иначе формируется сигнал  $\beta = 1$ . Затем с учетом  $f, \beta, U_{0, \text{НР}}$  в УП (НР) формирует разностная функция  $\xi_{i,u}$  которая определяет значение коммутационной функции  $K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u})$ , характеризующей состояние ключа  $VT$  (см. рис. 8) на

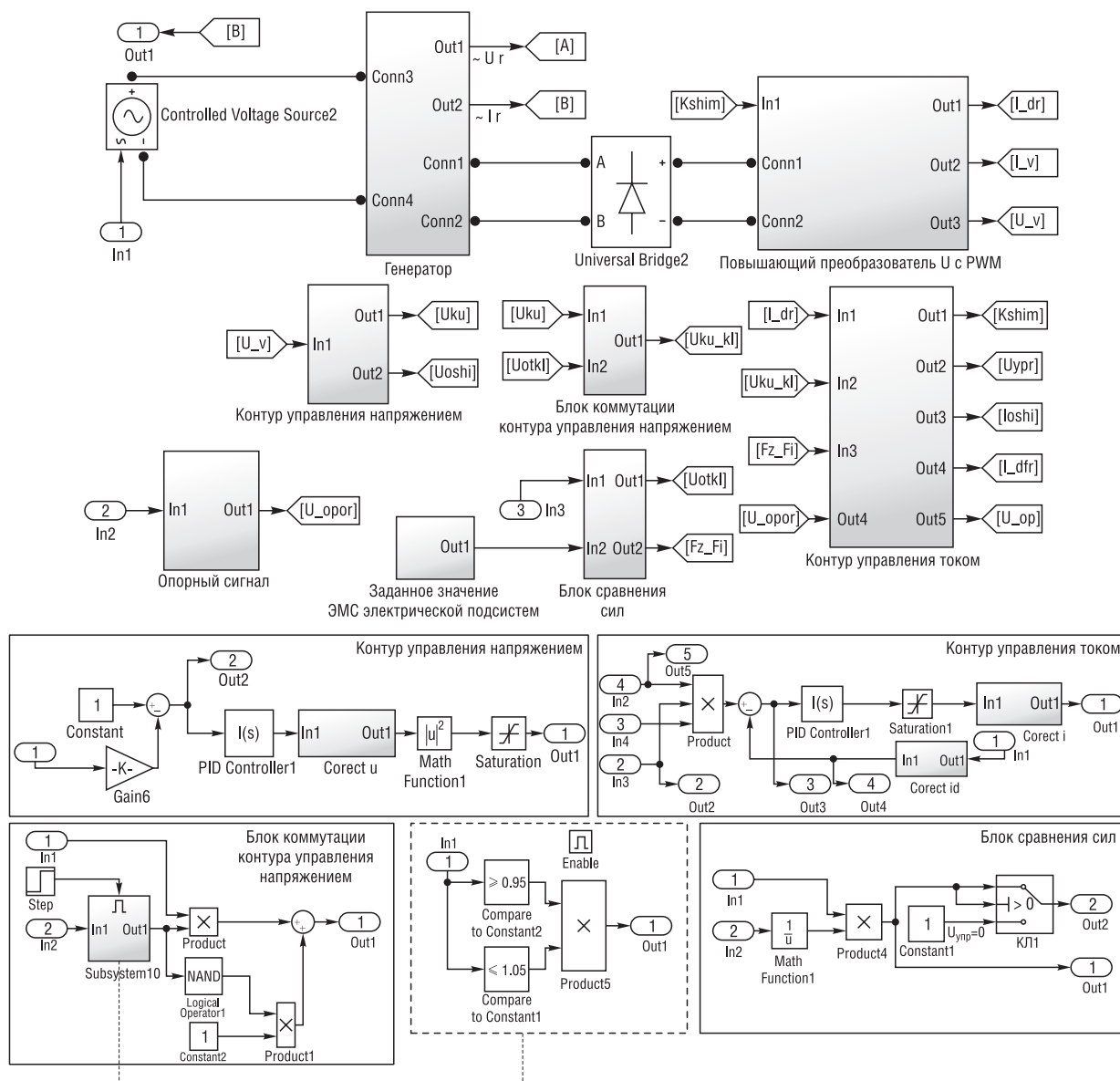


Рис. 9. Имитационные модели управляемого преобразователя, блока коммутации контура управления напряжением, блока сравнения сил механической и электрической подсистем в режиме «Работа»

Fig. 9. Simulation model of controlled converter, voltage control circuit switching unit, power comparison unit of mechanical and electrical subsystems in “Work mode”

каждом периоде ШИМ. На основании  $K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u})$  УП (НР) формирует ток  $i$  в рабочей обмотке генератора. Затем БФЭМС на основании тока  $i$  в рабочей обмотке генератора формирует ЭМС которая компенсирует рассогласование сил электрической и механической подсистем системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» в режиме «Работа».

Основные результаты имитационного моделирования системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» в режиме «Работа» представлены на рис. 11 и 12. Результаты имитационного моделирования системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» при согласованных силах электрической и механической подсистем в режиме «Работа» показаны на рис. 11.

На рис. 12 приводятся результаты имитационного моделирования системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа».

Анализ результатов имитационного моделирования системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» (см. рис. 11) показывает, что комбинированный ЭГВПД при согласованных силах электрической и механической подсистем в режиме «Работа» позволяет обеспечить непрерывное

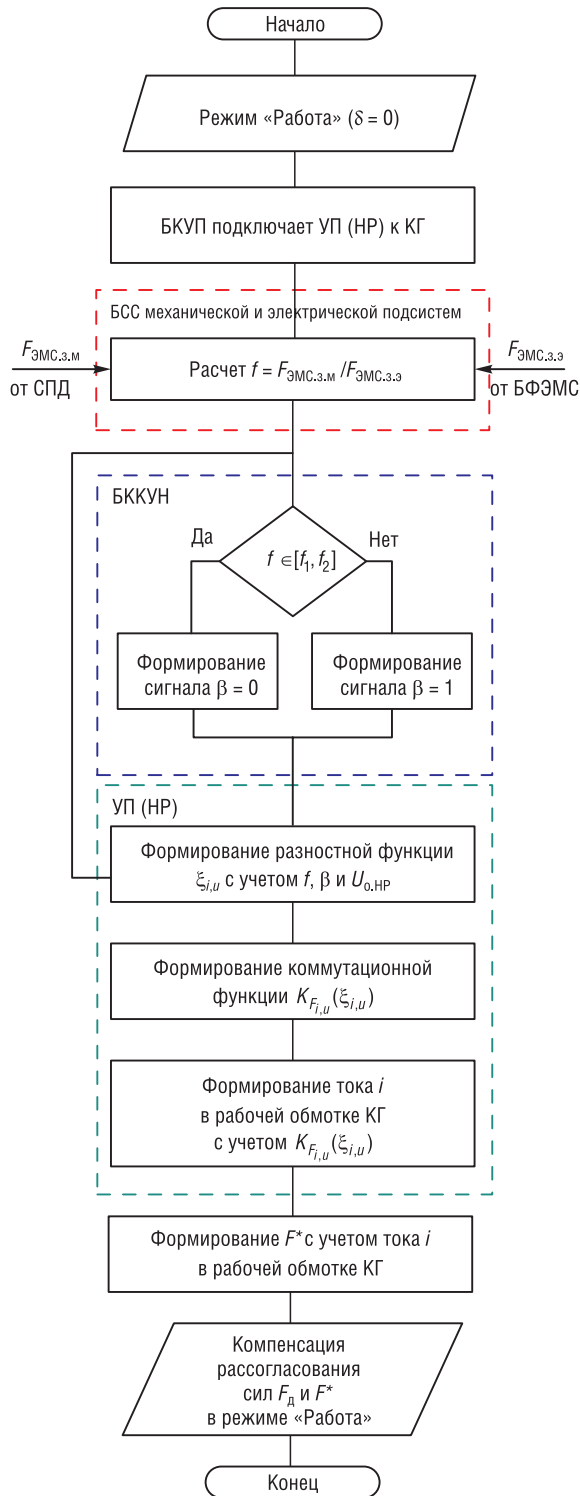


Рис. 10. Блок-схема алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения» в режиме «Работа»

Fig. 10. Block diagram of the algorithm for compensation of power mismatch between electrical and mechanical subsystems of the “free-piston engine – electromechanotronic converter based on an electric reciprocating generator” in the “Work mode”

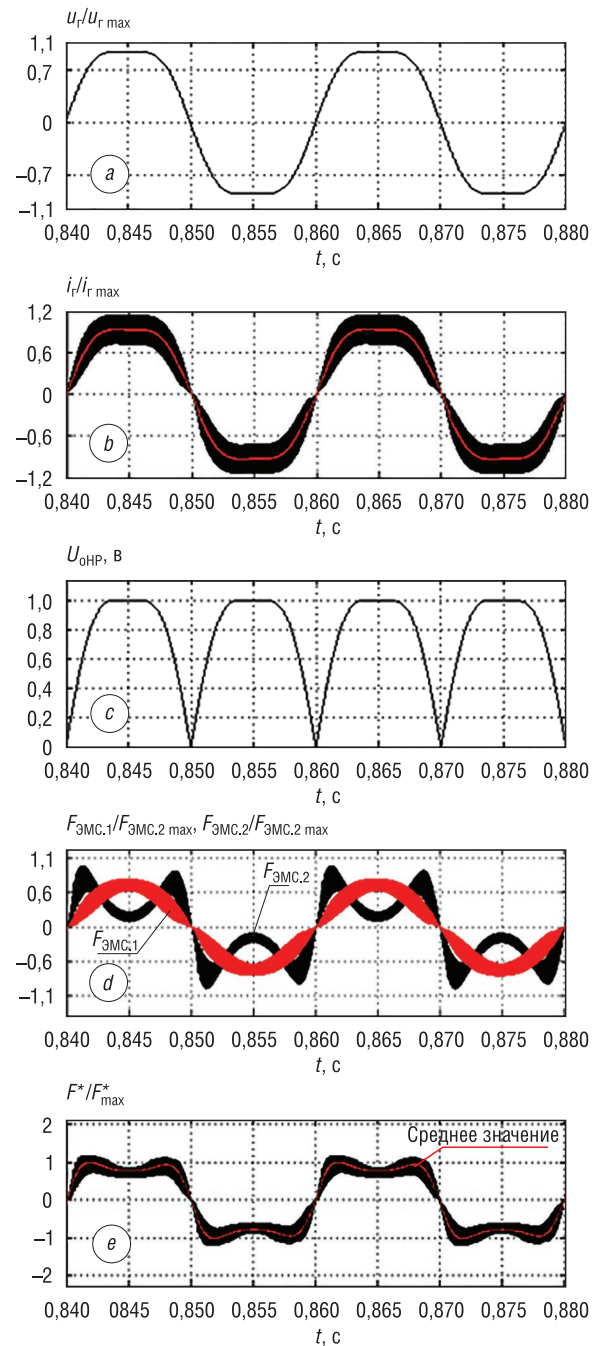


Рис. 11. Временные диаграммы: *a* – напряжения на зажимах рабочей обмотки комбинированного генератора; *b* – тока в рабочей обмотке комбинированного генератора; *c* – опорного сигнала; *d* – электромагнитных сил сформированных за счет поперечного и продольного изменения магнитных потоков соответственно; *e* – электромагнитная сила сформированная за счет комбинированного изменения магнитного потока при согласованных силах электрической и механической подсистем в режиме «Работа»

Fig. 11. Timing diagram: *a* – voltage at the terminals of the working winding of the combined generator; *b* – current in the working winding of the combined generator; *c* – reference signal; *d* – electromagnetic forces generated due to the transverse and longitudinal changes of the magnetic fluxes, respectively; *e* – electromagnetic forces formed due to the combined change in the magnetic flux at the agreed forces of the electrical and mechanical subsystems in the “Work mode”

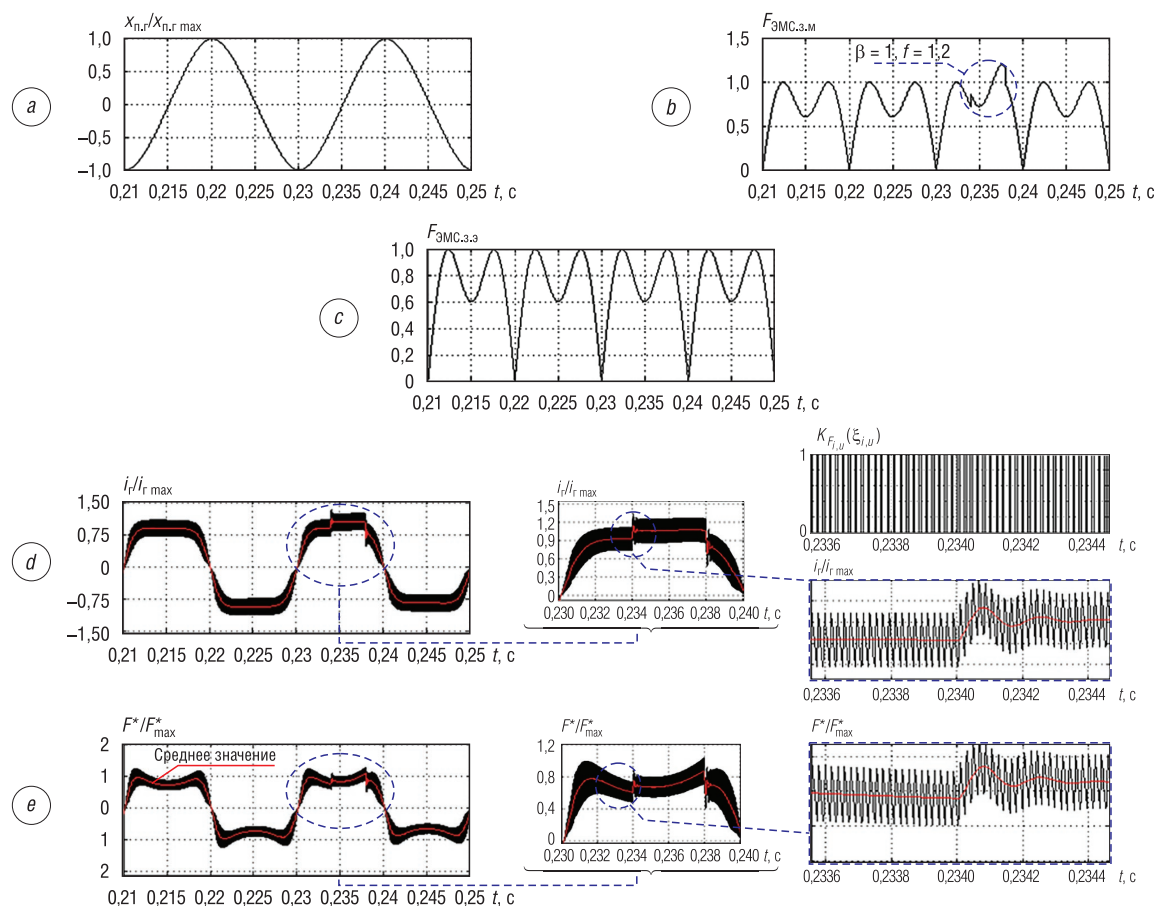


Рис. 12. Временные диаграммы: *a* – координаты перемещения поршневой группы; *b* – заданного значения электромагнитной силы от механической подсистемы; *c* – заданного значения электромагнитной силы от электрической подсистемы; *d* – тока в рабочей обмотке КГ и коммутационной функции; *e* – электромагнитная сила сформированная за счет комбинированного изменения магнитного потока при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа»

Fig. 12. Timing diagram: *a* – coordinates of the moving piston group; *b* – set value of the electromagnetic force from the mechanical subsystem; *c* – set value of the electromagnetic force from the electrical subsystem; *d* – current in the working winding of the combined generator and switching function; *e* – electromagnetic force formed due to the combined change in the magnetic flux when compensating for the mismatch of the forces of the electrical and mechanical subsystems in the “Work mode”

преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию на всем рабочем цикле системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД». Это повышает эффективность преобразования в системе «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию.

Также установлено (см. рис. 12), что комбинированный ЭГВПД, способен скомпенсировать рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа», что позволяет в данном режиме обеспечить баланс (согласования) сил механической и электрической подсистем и заданные значения кинематических параметров подвижной части системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД».

**Закключение.** Разработанная авторами в данной статье ИМ системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» дает возможность исследовать ее в различных режимах работы при изменении параметров электрической и механической подсистем. Особенностью разработанной ИМ является учет особенностей одновременного использования в магнитной системе ЭГВПД поперечного и продольного нелинейного изменения магнитных потоков.

Результаты проведенных исследований ИМ системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» позволили убедиться, что комбинированный ЭГВПД позволяет обеспечить непрерывное преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию на всем

рабочем цикле системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» и тем самым повысить эффективность преобразования в системе механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию; способен скомпенсировать рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа». А это в системе «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» позволяет обеспечить баланс (согласования) сил механической и электрической подсистем и заданные значения кинематических параметров подвижной части системы.

Научная значимость полученных результатов заключается в развитии теории электромеханики применительно к ЭМПЭ возвратно-поступательного движения.

### Список использованных источников

1. Зачепа, Ю. В. Автономные системы электроснабжения на базе асинхронных генераторов, основные требования и структура / Ю. В. Зачепа // *Электромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2010. – Вип. 2. – С. 32–40.
2. Цыркин, М. И. Дизельные агрегаты резервного питания / М. И. Цыркин, А. Я. Гольдингер. – СПб.: Чистое письмо, 2003. – 276 с.
3. Коськин, Ю. П. О терминологии и подготовке специалистов по электромеханотронике / Ю. П. Коськин, Д. В. Самохвалов // *Изв. С.-Петерб. гос. электротехн. ун-та «ЛЭТИ»*. – 2013. – № 1. – С. 57–66.
4. The free-piston linear generator potentials and challenges / F. Kock [et al.] // *MTZ Worldwide*. – 2013. – Vol. 74, № 10. – P. 38–43.
5. Hanipah, M. R. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications / M. R. Hanipah, R. Mikalsen, A. P. Roskilly // *Appl. Therm. Eng.* – 2015. – Vol. 75. – P. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>.
6. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигатель-генераторами / Ф. И. Пинский // *Мобильная техника*. – 2004. – № 2. – С. 13–17.
7. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С. Н. Поддубко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 207 с.
8. Менжинский, А. Б. Универсальная методика электромагнитного расчета возвратно-поступательных электрических генераторов с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // *Изобретатель*. – 2019. – № 5–6. – С. 38–48.
9. Петриченко, Д. А. Подход к электромеханическому управлению крайними положениями поршня в свободнопоршневом генераторе / Д. А. Петриченко, Л. Ю. Лежнев // *Достижения вузов. науки*. – 2014. – № 12. – С. 109–117.
10. Герасимов, Д. В. Исследование особенностей проектирования свободнопоршневого электрогенератора / Д. В. Герасимов // *Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук*. – 2000. – Т. 2, № 1. – С. 141–145.
11. Татарников, А. П. Разработка алгоритмов управления свободнопоршневой энергоустановки / А. П. Татарников, Д. А. Петриченко, В. В. Иванов // *Современные тенденции развития науки и технологий: сб. науч. тр. по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф.*, 31 дек. 2015 г.: в 8 ч. – Белгород: ИП Ткачева Е. П., 2015. – № 6–2. – С. 117–122.
12. Менжинский, А. Б. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем и электрическим генератором возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 304–320. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-304-320>
13. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учеб. для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – М.: Изд. дом МЭИ, 2016. – 632 с.

### References

1. Zachepa Yu. V. Autonomous power supply systems based on asynchronous generators, basic requirements and structure. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi = Electromechanical and Energy Saving Systems*, 2010, iss. 2, pp. 32–40 (in Russian).
2. Tsyarkin M. I., Gol'dinger A. Ya. *Diesel Backup Power Units*. St. Petersburg, Chistoe pis'mo Publ., 2003. 276 p. (in Russian).
3. Kos'kin Yu. P., Samokhvalov D. V. About terminology and the training of specialists in electromechatronic. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta "LETI" = Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2013, no. 1, pp. 57–66 (in Russian).
4. Kock F., Heron A., Rinderknecht F., Friedrich H. E. The free-piston linear generator potentials and challenges. *MTZ Worldwide*, 2013, vol. 74, no. 10, pp. 38–43. <https://doi.org/10.1007/s38313-013-0099-z>
5. Hanipah M. R., Mikalsen R., Roskilly A. P. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 75, pp. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>
6. Pinskiy F. I. Power plants with free piston engine generators. *Mobil'naya tekhnika* [Mobile Technology], 2004, no. 2, pp. 13–17 (in Russian).
7. Poddubko S. N., Amel'chenko P. A., Stasilevich A. G., Vityaz' P. A., Dubovik D. A., Vashchula A. V., Zhukovskii I. N., Klyuchnikov A. V. *21<sup>st</sup> Century Tractors: State and Prospects*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 207 p. (in Russian).



8. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Koval' Yu. G. Universal method of electromagnetic calculation of reciprocating electric generators with transverse and longitudinal non-linear changes in magnetic flux. *Izobretatel'* [Inventor], 2019, no. 5–6, pp. 38–48 (in Russian).

9. Petrichenko D. A., Lezhnev L. J. The Electromechanical approach to the management of the extreme positions of the piston free piston generator. *Dostizheniya vuzovskoi nauki* [Achievements of High School Science], 2014, no. 12, pp. 109–117 (in Russian).

10. Gerasimov D. V. Study of design features of a free-piston electric generator. *Izvestiya Samarskogo nauchno-go tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2000, vol. 2, no. 1, pp. 141–145 (in Russian).

11. Tatarnikov A. P., Petrichenko D. A., Ivanov V. V. Development of control algorithms for a free piston power plant. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov po materialam VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 30 sentyabrya 2015 g. No. 6, ch. 2* [Current Trends in the Development of Science and Technology: A Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the VI International Scientific and Practical Conference, September 30, 2015. Vol. 6-2]. Belgorod, IP Tkacheva E. P., 2015, pp. 117–122 (in Russian).

12. Menzhinskii A. B. Coordination of forces of mechanical and electric subsystems of power plant with free piston engine and electric generator of reciprocating type. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 304–320 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-304-320>

13. Rozanov Yu. K., Ryabchitskii M. V., Kvasnyuk A. A. *Power Electronics*. Moscow, Publ. House of the Moscow Energy Institute, 2016. 632 p. (in Russian).

### Информация об авторах

Менжинский Андрей Борисович – старший преподаватель, кафедра электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volna05011990@mail.ru

Малашин Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь).

### Information about the authors

Andrei B. Menzhinsky – Senior Lecturer, Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volna05011990@mail.ru

Andrey N. Malashin – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Professor of the Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).