

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.313

МЕНЖИНСКИЙ
Андрей Борисович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Минск, 2020

Работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель **МАЛАШИН Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания УО «Военная академия Республики Беларусь»

Официальные оппоненты: **ФИРАГО Бронислав Иосифович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета;

ЛЕНЕВСКИЙ Геннадий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» межгосударственного образовательного учреждения высшего образования «Белорусско-Российский университет»

Оппонирующая организация УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Защита состоится 24 сентября 2020 года в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.02 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 2, ауд. 201, тел. ученого секретаря: +375(17) 292-71-73, адрес электронной почты: ropomarenkoe@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « » июля 2020 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



Е. Г. Пономаренко

ВВЕДЕНИЕ

Большинство электроагрегатов (ЭА), 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. Характерными недостатками такого типа ЭА, которые напрямую определяют эффективность АСЭС, являются большая удельная масса и недостаточно высокий коэффициент полезного действия (КПД).

В связи с этим в зарубежных странах в качестве перспективного ЭА рассматривается система «свободнопоршневой двигатель (СПД) – электромеханотронный преобразователь (ЭМТП) на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения (ЭГВПД)». На среднесрочную перспективу в Республике Беларусь также планируется осуществить переход на свободнопоршневые установки.

Электроагрегаты с СПД и ЭГВПД поперечного типа имеют ряд нерешенных проблем, которые ограничивают возможные области их применения, основной из которых является несогласованность сил электрической и механической подсистем. Поскольку при работе ЭА из-за этого не обеспечивается непрерывное электромеханическое преобразование энергии на всем рабочем ходе, а также увеличивается вероятность поломки при пропуске зажигания рабочей смеси в цилиндре и может возникнуть неустойчивость работы при колебаниях нагрузки. Поэтому решение задачи согласования сил электрической и механической подсистем весьма актуально.

На основе проведенных исследований ЭГВПД установлено, что ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока и управлением током в рабочей обмотке способен решить задачу согласования сил электрической и механической подсистем. В связи с этим диссертация посвящена разработке принципов реализации ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока, а также методик электромагнитного расчета и структурно-параметрического синтеза для улучшения энергетических и массогабаритных показателей.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации включена в план научной работы учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» (УО «ВА РБ»). Содержание диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585,

п. 1.6), на 2016–2020 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь 12.03.2015 № 190, п. 1), а также приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 годы (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 № 166, п. 1.2).

Связь с научными программами характеризуется реализацией результатов диссертации в следующих научно-исследовательских работах (НИР): «Разработка математической модели энергоустановки для автономного образца вооружения на базе возвратно-поступательного электрического генератора полной мощностью до 15 кВА»; «Создание лабораторной установки для исследования характеристик перспективного возвратно-поступательного электрического генератора»; «Разработка облика роботизированного отсекавателя преследования подразделений сил специальных операций»; «Обоснование тактико-технических требований для модернизации радиостанций Р-140-0,5 и Р-140М»; «Разработка технических предложений по усовершенствованию фиксаторов мачты и антенного поста базовой мобильной быстроразвертываемой платформы типа МБРП-30-200»; «Совершенствование системы автономного электроснабжения базовой мобильной быстроразвертываемой платформы (МБРП-30-200) посредством оптимального выбора её элементов»; «Технический облик перспективной системы энергоснабжения полевых и мобильных узлов связи»; «Разработка перспективной автономной системы электроснабжения вооружения и военной техники»; «Исследование путей повышения эффективности электрических машин возвратно-поступательного движения».

Цель и задачи исследования

Цель исследования заключается в разработке принципов реализации электрических генераторов возвратно-поступательного движения с поперечным и продольным изменением магнитного потока, а также методик электромагнитного расчета и структурно-параметрического синтеза для улучшения энергетических и массогабаритных показателей.

Для достижения указанной цели потребовалось решить следующие задачи:

- разработать структуры электрических генераторов возвратно-поступательного движения с поперечным и продольным изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку;
- разработать математические модели электрических генераторов возвратно-поступательного движения;
- разработать способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем электроагрегата со свободнопоршневым двигателем и электрическим генератором возвратно-поступательного движения;
- разработать методики электромагнитного расчета и структурно-параметрического синтеза электрических генераторов возвратно-поступа-

тельного движения с поперечным и продольным изменением магнитного потока;

– разработать имитационную модель системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения».

Объект исследования: электроагрегат со свободнопоршневым двигателем и электрическим генератором возвратно-поступательного движения с управляемым преобразователем напряжения.

Предмет исследования: электрический генератор возвратно-поступательного движения с управляемым преобразователем напряжения.

Научная новизна

1. Разработаны структуры электрических генераторов возвратно-поступательного движения, отличающиеся:

– продольным изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку;

– одновременным использованием поперечного и продольного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку, что позволяет уменьшить удельную массу электрических генераторов возвратно-поступательного движения с одновременным повышением коэффициента полезного действия.

2. Разработаны математические модели электрических генераторов возвратно-поступательного движения продольного и комбинированного типов, отличающиеся учетом поперечного и продольного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку, нелинейности кривой намагничивания ферромагнитных материалов и неравномерности распределения магнитного потока в воздушном зазоре. Разработанные математические модели позволяют получить мгновенные значения напряжения, тока, мощности и составляющих электромагнитной силы электрических генераторов возвратно-поступательного движения продольного и комбинированного типов.

3. Предложен способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем электроагрегата с электрическим генератором возвратно-поступательного движения, основанный на использовании в электрической подсистеме электрического генератора возвратно-поступательного движения с поперечным и продольным изменением магнитного потока и управлением током в рабочей обмотке, что позволяет обеспечить непрерывное электромеханическое преобразование энергии на всем рабочем ходе и уменьшить удельную массу электрической подсистемы на 12–14 % при одновременном повышении коэффициента полезного действия на 2,3–3,3 %.

4. Разработана методика структурно-параметрического синтеза комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения, основанная на использовании в качестве целевой функции минимума удельной массы модульного комбинированного генератора. Разработанная методика позволяет провести синтез комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения с минимальной удельной массой и заданным коэффициентом полезного действия.

5. Разработана имитационная модель системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения», отличающаяся учетом в электрическом генераторе возвратно-поступательного движения одновременного использования поперечного и продольного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку.

Положения, выносимые на защиту

1. Структуры электрических генераторов возвратно-поступательного движения, отличающиеся продольным и комбинированным изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку.

2. Математические модели электрических генераторов возвратно-поступательного движения продольного и комбинированного типов, отличающиеся учетом поперечного и продольного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку, нелинейности кривой намагничивания ферромагнитных материалов и неравномерности распределения магнитного потока в воздушном зазоре, позволяющие получить мгновенные значения напряжения, тока, мощности и составляющих электромагнитной силы электрических генераторов возвратно-поступательного движения продольного и комбинированного типов.

3. Способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем электроагрегата с электрическим генератором возвратно-поступательного движения, отличающийся использованием в электрической подсистеме электрического генератора возвратно-поступательного движения с поперечным и продольным изменением магнитного потока и управлением током в рабочей обмотке, что позволяет обеспечить непрерывное электромеханическое преобразование энергии на всем рабочем ходе и уменьшить удельную массу электрической подсистемы на 12–14 % при одновременном повышении коэффициента полезного действия на 2,3–3,3 %.

4. Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения, отличающаяся использованием в качестве целевой функции минимума удельной массы модульного комбинированного генератора, позволяющая провести синтез комбинированного электрического генератора возвратно-поступа-

тельного движения с минимальной удельной массой и заданным коэффициентом полезного действия.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты, приведенные в диссертации, получены автором самостоятельно. Основным соавтором публикаций является научный руководитель – кандидат технических наук, доцент А. Н. Малашин, который определял цель, ставил задачи исследований, принимал участие в выборе методов исследований и обсуждении результатов. Совместно с научным руководителем разработана имитационная модель управляемого преобразователя.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались на: Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации» (г. Гомель, 2014); международной военно-научной конференции (Российская Федерация, г. Тверь, 2015); Форумах проектов программ Союзного государства–III, IV Форумах вузов инженерно-технологического профиля (г. Минск, 2014, 2015); международных военно-научных и научно-технических конференциях ВА РБ (г. Минск, 2014–2017); VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций» (Российская Федерация, г. Воронеж, 2016); 15-й и 16-й Международных научно-технических конференциях «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2017, 2018); XIII и XIV Международных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых (Российская Федерация, г. Иваново, 2018, 2019); II международной научно-практической конференции БГАА (г. Минск, 2018).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 12 статьях в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК Республики Беларусь, общим объемом 7,5 авторских листа, 1 статье в сборнике научных работ, 1 статье в сборнике статей по материалам конференции, 2 статьях в электронной версии международного научно-технического журнала, 13 тезисах докладов и материалов конференций, 1 патенте Республики Беларусь на изобретение и 2 патентах Республики Беларусь на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка, приложений.

Общий объем диссертации составляет 239 страниц. В том числе: 138 страниц основного текста (без иллюстраций, библиографического списка и приложений), 11 таблиц и 202 рисунка, расположенных в тексте диссертации, список использованных источников, насчитывающий 183 наименования, и список публикаций автора по теме диссертации на 21 странице, а также приложения на 17 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** проведен анализ состояния и перспектив развития электроагрегатов (ЭА) на базе электрических генераторов возвратно-поступательного движения (ЭГВПД). Отмечено, что такие ЭА имеют ряд нерешенных проблем, которые ограничивают возможные области их применения, основной из которых является несогласованность сил электрической и механической подсистем. Обоснована необходимость разработки ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока для решения задачи согласования сил электрической и механической подсистем. В связи с этим разработка принципов реализации (в виде структур) ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока, а также методик электромагнитного расчета и структурно-параметрического синтеза для улучшения энергетических и массогабаритных показателей весьма актуальны. Проведен анализ современных методов исследования электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ).

Во **второй главе** описывается разработанный ряд структур ЭГВПД, отличающихся продольным и комбинированным изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку. Проведена совместная классификация ЭГВПД поперечного, продольного и комбинированного типов. В качестве примера на рисунке 1 представлен вариант структуры комбинированного генератора (КГ) с общим магнитопроводом (МПр).

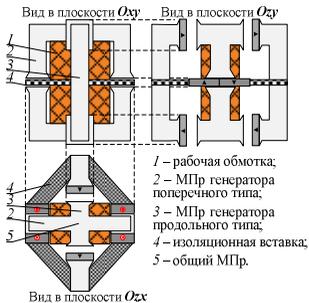


Рисунок 1. – Структура КГ с общим МПр

Для каждой области магнитной системы ЭГВПД построены двухмерные конечно-элементные модели магнитного поля, анализ которых позволил определить магнитные потоки и построить эквивалентные схемы магнитных цепей генераторов. С учетом эквивалентных схем магнитных цепей генераторов получены выражения для расчета магнитных потоков, проходящих через рабочую обмотку генераторов. С использованием полученных выражений для расчета магнитных потоков, проходящих через рабочую обмотку,

ку генераторов, разработаны линейные математические модели (ММ) ЭГВПД на основе уравнений Кирхгофа. При этом уравнения электрического равновесия для k -го контура электромагнитных и магнитоэлектрических ЭГВПД можно представить в виде:

$$i_k R_{0k} + i_k R_n + L_n \frac{di_k}{dt} + L_{0k} \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{dL_{0k}}{dt} + \sum_{n=1, n \neq k}^s \left(L_{kn} \frac{di_n}{dt} + v_r i_n \frac{dL_{kn}}{dx} \right) = 0; \quad (1)$$

$$i_k R_{0k} + i_k R_n + L_n \frac{di_k}{dt} + L_{0k} \frac{di_k}{dt} + i_k \frac{dL_{0k}}{dt} + \sum_{n=1, n \neq k}^s \left(v_r \frac{d\Psi_{kn}^{\text{ПМ}}}{dx} \right) = 0, \quad (2)$$

где R_{0k} и R_n – активное сопротивление рабочей обмотки генератора и нагрузки; i_k – ток k -го контура; L_n и $L_{0k} = \Phi_{i_k} w_k / i_k$ – индуктивность нагрузки и собственная индуктивность k -го контура; $L_{kn} = \Phi_{i_n} w_k / i_n$ – взаимные индуктивности k -го и n -го контуров; i_n – ток n -го контура; $v_r = dx/dt$ – скорость перемещения подвижной части генератора; $\Psi_{kn}^{\text{ПМ}}$ – потокосцепление k -го контура, обусловленное n -м постоянным магнитом (ПМ), $n \neq k$; Φ_{i_k} и Φ_{i_n} – магнитные потоки через k -й контур, созданные током k -го и n -го контура; w_k – количество витков k -го контура.

Методом конечных элементов (МКЭ) получены коэффициенты рассеяния и выпучивания (уточняющие коэффициенты) магнитного потока в ЭГВПД продольного типа, использование которых в линейных ММ позволяет повысить точность расчетов мгновенных значений напряжения, тока и мощности генераторов на 15,1–26,9 % по сравнению с традиционными ММ на основе уравнений Кирхгофа, где расчет магнитных проводимостей воздушных зазоров осуществляется по методу Ротерса. Выражения (1) и (2) с уточняющими коэффициентами целесообразно применять на начальных этапах электромагнитного расчета генераторов и решения задач оптимизации. Для уточнения номинальных параметров генераторов на завершающих этапах электромагнитного расчета разработаны нелинейные ММ электромагнитных и магнитоэлектрических ЭГВПД на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала:

$$i_k (R_{0k} + R_n) + L_n di_k/dt + \left(w_k i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS \right) di_k/dt + \\ + i_k w_k d \left(i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS \right) / dt + w_k d \left(S^{-1} \oint A_{zk[i_1, \dots, i_n, n \neq k]} dS \right) / dt = 0; \quad (3)$$

$$i_k (R_{0k} + R_n) + L_n di_k / dt + \left(w_k i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS \right) di_k / dt + \\ + i_k w_k d \left(i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS \right) / dt + w_k d \left(S^{-1} \oint A_{zk[F_{n1} \dots F_{nn}, n \neq k]} dS \right) / dt = 0, \quad (4)$$

где $i_k^{-1} S^{-1} \oint A_{zk[i_k]} dS$ – собственная индуктивность на один виток k -го контура; $S^{-1} \oint A_{zk[i_1 \dots i_n, n \neq k]} dS$ и $S^{-1} \oint A_{zk[F_{n1} \dots F_{nn}, n \neq k]} dS$ – потокосцепления на один виток k -го контура, созданные током n -го контура и n -м ПМ; A_z – компонента векторного магнитного потенциала.

Интегрирование в выражениях (3) и (4) ведется по поперечному сечению обмотки, а S – площадь этого поперечного сечения. Уравнения (3) и (4) дополнительно учитывают особенности конфигурации магнитной системы, нелинейность кривой намагничивания ферромагнитных материалов и неравномерность распределения магнитного потока в воздушном зазоре.

В целях исследования сил, действующих на поршневую группу СПД, со стороны электрической подсистемы разработаны ММ для расчета электромагнитной силы (ЭМС), которые имеют следующий вид:

1) для ЭГВПД поперечного типа (с двумя воздушными зазорами):

$$F_{\text{ЭМС поп.}} = 2F_m i_k w_k \mu_0 l_{\text{ПМ}} k \sigma^{-1} / \left(h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + 2\delta \right), \quad (5)$$

где F_m – магнитодвижущая сила ПМ; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; $l_{\text{ПМ}}$ и $h_{\text{ПМ}}$ – длина и толщина ПМ; k и σ – коэффициенты выпучивания и рассеяния магнитного потока в магнитной системе ЭГВПД поперечного типа; μ_r – внутренняя проницаемость ПМ; δ – величина воздушного зазора;

2) для ЭГВПД продольного типа ЭМС $F_{\text{ЭМС прод.}}$ может быть представлена в виде трех составляющих:

$$F_{1,1} = \mp F_m^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} \left[h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\text{min}} + (0,5h \pm x^{**}) \right]^{-2}; \quad (6)$$

$$F_{1,2} = \mp 0,25 (i_k w_k)^2 \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} \left[h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\text{min}} + (0,5h \pm x^{**}) \right]^{-2}; \quad (7)$$

$$F_{1,3} = F_m i_k w_k \mu_0 S_\delta k' \sigma'^{-1} \left[h_{\text{ПМ}} \mu_0 \mu_r^{-1} + \delta_{\text{min}} + (0,5h \pm x^{**}) \right]^{-2}, \quad (8)$$

где S_δ – площадь поперечного сечения воздушного зазора; k' и σ' – коэффициенты выпучивания и рассеяния магнитного потока в магнитной системе ЭГВПД продольного типа; δ_{min} – минимальная величина воздушно-

го зазора; h и x^{**} – ход и координата перемещения подвижной части ЭГВПД продольного типа;

3) для ЭГВПД комбинированного типа:

$$F^* = F_{\text{ЭМС поп.}} + F_{\text{ЭМС прод.}} \quad (9)$$

Совокупность выражений (1), (2), (5) – (9) представляют собой линейную с уточняющими коэффициентами ММ электрической подсистемы, а совокупность выражений (3) – (9) представляют собой нелинейную ММ электрической подсистемы ЭА на базе ЭГВПД.

Предложен способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем ЭА с ЭГВПД, отличающийся использованием в электрической подсистеме ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока и управлением током в рабочей обмотке. Структура и основные магнитные потоки базового модуля ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока (КГ) с общим МПР представлены на рисунке 2, где обозначено: $\Phi_{\text{ol}(\text{o2})}$, $\Phi_{\text{do1}(\text{do2})}$ и Φ_{Σ} – рабочие магнитные потоки ЭГВПД поперечного, продольного и комбинированного типов соответственно. Составляющие ЭМС ЭГВПД поперечного, продольного и комбинированного типов, зависящие от i_k , F_M и координаты перемещения подвижной части при работе генераторов на линейную нагрузку, представлены на рисунке 3.

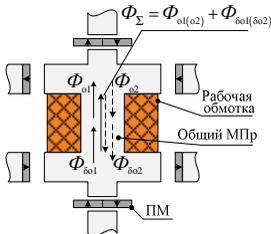


Рисунок 2. – Структура и магнитные потоки базового модуля КГ с общим МПР

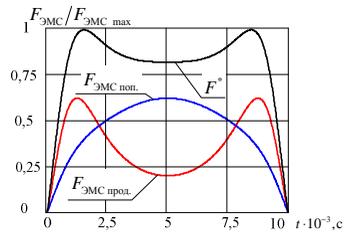


Рисунок 3. – Временные диаграммы ЭМС ЭГВПД

Анализ результатов математического моделирования составляющих ЭМС ЭГВПД (рисунок 3) показал, что целесообразно рассмотреть возможность решения задачи согласования сил электрической и механической подсистем за счет использования в электрической подсистеме ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока. Входе математического моделирования электрической и механической подсистем установлено, что комбинированный ЭГВПД при работе на линейную нагрузку не в полной мере способен обеспечить согласование сил

электрической и механической подсистем, особенно в крайних положениях поршневой группы. В случае аварийного режима работы (например, пропуск зажигания рабочей смеси в цилиндре) это может привести к поломке ЭА. Проведенные исследования ЭГВПД выявили, что решение этой проблемы представляется возможным при управлении ЭМС комбинированного ЭГВПД. Управление ЭМС возможно реализовать за счет управления током в рабочей обмотке генератора, для чего предлагается использовать управляемый преобразователь (УП).

В **третьей главе** получены новые, не описанные в литературе, закономерности: особенности влияния площади поперечного сечения МПр $S_{МПр}$, ширины обмоточного окна и величины рабочего хода ЭГВПД продольного типа на изменения магнитных потоков рассеяния и выпучивания; особенности влияния $S_{МПр}$ и кинематических параметров (скорость, частота и координата перемещения) подвижной части ЭГВПД продольного и комбинированного типов на изменения электродвижущей силы (ЭДС) движения генераторов. Установленные закономерности позволили выработать практические рекомендации по выбору геометрических размеров магнитной системы на начальном этапе электромагнитного расчета генераторов. Это позволяет сократить затраты на создание генераторов за счет ускорения и снижения стоимости процессов проектирования и экспериментальной доработки генераторов.

Разработана универсальная методика электромагнитного расчета магнитоэлектрических ЭГВПД продольного, поперечного и комбинированного типов, блок-схема алгоритма которой представлена на рисунке 4.

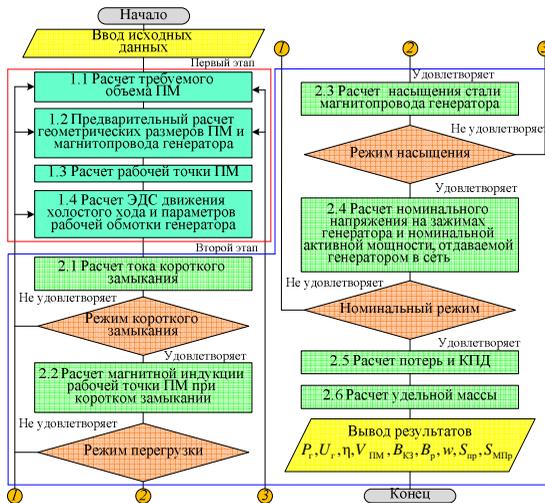


Рисунок 4. – Блок-схема алгоритма универсальной методики электромагнитного расчета ЭГВПД

Отличительной особенностью предложенной методики является использование МКЭ для определения магнитных потоков через рабочую обмотку генераторов, и ММ генераторов на основе уравнений Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала. На основании разработанной методики (см. рисунок 4) получены новые, не описанные в литературе, особенности влияния $S_{\text{МПр}}$, числа витков рабочей обмотки w , величины рабочего хода и активной мощности ЭГВПД продольного типа на изменения удельной массы и КПД.

В главе 3 также разработана методика структурно-параметрического синтеза комбинированного ЭГВПД, основанная на использовании в качестве целевой функции минимума удельной массы модульного КГ, блок-схема алгоритма которой представлена на рисунке 5.

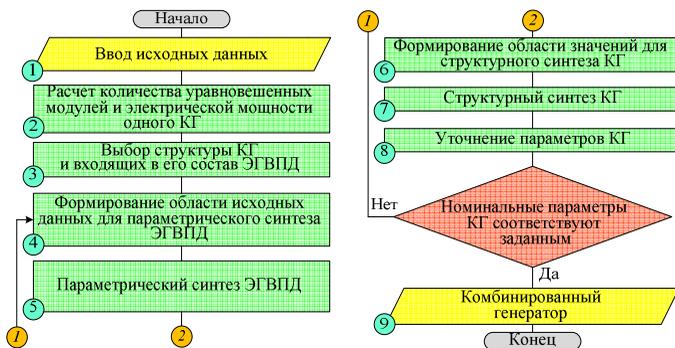


Рисунок 5. – Блок-схема алгоритма методики структурно-параметрического синтеза комбинированного ЭГВПД

Ниже кратко рассмотрены этапы методики структурно-параметрического синтеза комбинированного ЭГВПД. На начальных 1-м–4-м этапах методики с учетом исходных данных осуществляется: расчет количества уравновешенных модулей и номинальной активной электрической мощности одного КГ $P_{\text{г.мод}}$; выбор структуры КГ и входящих в его состав ЭГВПД (модули); формирование области исходных данных для решения задачи параметрического синтеза выбранных ЭГВПД. В зависимости от типа КГ в качестве модулей рассматриваются: для КГ с раздельным МПр – ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока; для КГ с общим МПр – ЭГВПД комбинированного типа с общим МПр. Для формирования области исходных данных в мощностном диапазоне $P_{\text{г.мин}} \dots P_{\text{г.мод}}$ с заданным шагом Δ проводится электромагнитный расчет (см. рисунок 4) выбранных ЭГВПД. $P_{\text{г.мин}}$ – минимальная активная электрическая мощность одного модуля входящего в состав КГ. Область исходных данных включает: номинальную активную мощность, отдаваемую генератором в сеть $P_{\text{г}}$;

номинальное напряжение на зажимах генератора U_r ; КПД генератора η ; объем ПМ $V_{\text{ПМ}}$; магнитную индукцию рабочей точки ПМ в режиме короткого замыкания (КЗ) $B_{\text{КЗ}}$ и в номинальном режиме B_p ; w ; $S_{\text{МПр}}$; площадь поперечного сечения медного проводника рабочей обмотки $S_{\text{пр}}$.

На 5-м *этапе* методики в мощностном диапазоне $P_{\text{г.мин}} \dots P_{\text{г.мод}}$ с шагом Δ осуществляется параметрический синтез ЭГВПД. В результате параметрического синтеза генератора решается задача нахождения значений переменных $S_{\text{МПр}}$ и w , обеспечивающих минимум удельной массы генератора «масса/мощность» $m_r(S_{\text{МПр}}, w) / P_r(S_{\text{МПр}}, w) \rightarrow \min$ и удовлетворяющих заданным ограничениям: $V_{\text{ПМ}}(S_{\text{МПр}}) \geq V_{\text{ПМ.зад}}$; $B_{\text{р1}} \leq B_p(S_{\text{МПр}}) \leq B_{\text{р2}}$; $U_{\text{г.зад1}} \leq U_r(S_{\text{МПр}}, w) \leq U_{\text{г.зад2}}$; $P_{\text{г.зад1}} \leq P_r(S_{\text{МПр}}, w) \leq P_{\text{г.зад2}}$; $B_{\text{КЗ1}} \leq B_{\text{КЗ}}(S_{\text{МПр}}, w) \leq B_{\text{КЗ2}}$; $\eta(S_{\text{МПр}}, w) \geq \eta_{\text{зад}}$; $B_m(S_{\text{МПр}}) \leq B_{\text{ст.макс}}$; $J(S_{\text{МПр}}, w) \leq J_{\text{зад}}$; $3 \leq \frac{I_{\text{КЗ}}(S_{\text{МПр}}, w)}{I_n} \leq 4$.

Здесь $B_{\text{ст.макс}}$ – магнитная индукция насыщения стали МПР; B_m – амплитуда магнитной индукции в МПР; J и I_n – плотность тока и номинальный ток в рабочей обмотке генератора; $I_{\text{КЗ}}$ – ток КЗ.

Результатом решения задачи параметрического синтеза ЭГВПД являются оптимальные значения $S_{\text{МПр}}$ и w , а также соответствующие им P_r , минимальная удельная масса $M_{\text{уд.мин}}$, суммарные потери $P_{\Sigma\text{п}}$ и η . Полученные значения P_r , $M_{\text{уд.мин}}$, η и $P_{\Sigma\text{п}}$ и количество модулей ЭГВПД (*6-й этап* методики) формируют область значений для структурного синтеза КГ с отдельным или общим МПР: **A**, **B** и **C** – матрицы параметров ЭГВПД поперечного, продольного и комбинированного типов с общим МПР соответственно; **N**, **M** и **K** – матрицы-столбцы, определяющие количество модулей ЭГВПД поперечного, продольного и комбинированного типов с общим МПР соответственно. На 7-м *этапе* методики осуществляется структурный синтез КГ. В результате структурного синтеза КГ с отдельным МПР решается задача нахождения переменных a_{z1} , b_{q1} , m_g и n_f , обеспечивающих минимум удельной массы КГ $(n_f a_{z1} a_{z2} + m_g b_{q1} b_{q2}) / (n_f a_{z1} + m_g b_{q1}) \rightarrow \min$ с заданными ограничениями по $P_{\text{г.мод}} = n_f a_{z1} + m_g b_{q1}$ и $\eta_{\text{зад}}$, где a_{z1} , $z = 1, 2, \dots, n$ и b_{q1} , $q = 1, 2, \dots, n$ – номинальная активная мощность, отдаваемая ЭГВПД поперечного и продольного типов в сеть; n_f , $f = 1, 2, \dots, c$ и m_g , $g = 1, 2, \dots, v$ – количество модулей ЭГВПД поперечного и продольного типов; a_{z2} и b_{q2} – $M_{\text{уд.мин}}$ ЭГВПД поперечного и продольного типов.

В результате структурного синтеза КГ с общим МПр решается задача нахождения переменных c_{y1} и k_f , обеспечивающих минимум удельной массы КГ $c_{y2} \rightarrow \min$ с заданными ограничениями по $P_{г.мод} = k_f c_{y1}$ и $\eta_{зад}$, где $c_{y1}, y = 1, 2, \dots, n$ – номинальная активная мощность, отдаваемая ЭГВПД комбинированного типа с общим МПр в сеть; $k_f, f = 1, 2, \dots, c$ и $c_{y2}, y = 1, 2, \dots, n$ – количество модулей и $M_{уд\ min}$ ЭГВПД комбинированного типа с общим МПр. Для решения задач параметрического и структурного синтеза КГ выбран метод сканирования. На 8-м этапе методики с помощью нелинейной ММ (4) проводится уточнение номинальных параметров КГ: U_r , P_r и тока в рабочей обмотке. Если номинальные параметры не соответствуют заданным, то на этапах 1.1, 1.2 и 1.4 методики (см. рисунок 4) корректируются параметры $V_{ПМ}, S_{МПр}, w$, после чего итерации этапов 4–8 методики (см. рисунок 5) повторяются. Затем строится двумерная конечно-элементная модель магнитного поля КГ, с целью уточнения геометрических размеров и конфигурации магнитной системы КГ. Результатом структурно-параметрического синтеза является структура КГ с $M_{уд\ min}$ при заданном КПД.

В четвертой главе разработана имитационная модель (ИМ) системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД». Отличительной особенностью ИМ является учет в ЭГВПД одновременного использования поперечного и продольного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку. Разработанная ИМ позволяет проводить численные эксперименты с системой «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД», что обеспечивает сокращение сроков разработки ЭА на базе ЭГВПД.

Основные результаты имитационного моделирования ЭА на базе ЭГВПД в режиме «Авария» и «Работа» представлены на рисунках 6 и 7. На рисунке 6 представлены временные диаграммы: а – сил, действующих со стороны механической F_d и электрической F^* подсистем; б – разности модулей сил механической и электрической подсистем при торможении поршневой группы в режиме «Авария».

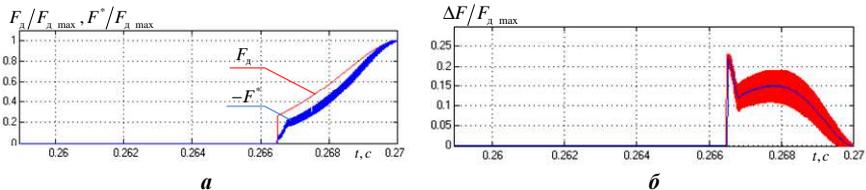


Рисунок 6. – Результаты имитационного моделирования ЭА на базе ЭГВПД в режиме «Авария»

На рисунке 7 представлены временные диаграммы: *a* – напряжения u на зажимах рабочей обмотки ЭГВПД комбинированного типа; *б* – тока i в рабочей обмотке ЭГВПД комбинированного типа; *в* – ЭМС $F_{\text{ЭМС.1}}$, $F_{\text{ЭМС.2}}$, сформированных за счет поперечного и продольного изменения магнитных потоков; *г* – ЭМС F^* , сформированной за счет комбинированного изменения магнитного потока.

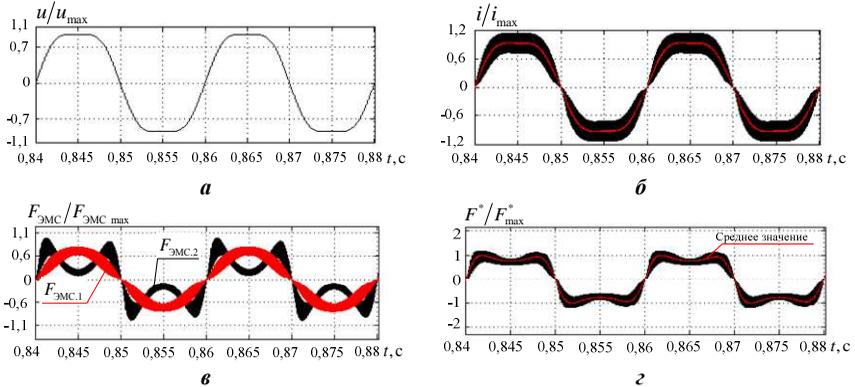


Рисунок 7. – Результаты имитационного моделирования ЭА на базе ЭГВПД в режиме «Работа»

Анализ результатов имитационного моделирования ЭА на базе ЭГВПД (рисунки 6 и 7) показал, что ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока и управлением током в рабочей обмотке, способен решить задачу согласования сил механической и электрической подсистем, что позволяет обеспечить непрерывное электромеханическое преобразование энергии на всем рабочем ходе в режиме «Работа», а также затормозить поршневую группу в крайнем положении в режиме «Авария».

Результаты математического моделирования показали, что использование в электрической подсистеме ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока позволяет уменьшить удельную массу электрической подсистемы на 12–14 % с одновременным повышением КПД на 2,3–3,3 %.

В главе 4 также проведены экспериментальные исследования макета ЭГВПД продольного типа. В результате экспериментальных исследований макета подтверждена адекватность линейной и нелинейной ММ ЭГВПД продольного типа. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов показало, что их расхождение составляет не более 6,9 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны структуры ЭГВПД для АСЭС на базе ЭА со СПД, отличающиеся продольным и комбинированным изменением магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку. Новизна технических решений структур ЭГВПД защищена тремя патентами Республики Беларусь [3, 5, 8, 9, 12, 14, 16, 18, 19, 21, 23, 24, 28, 30–32].

2. Разработаны ММ ЭГВПД продольного и комбинированного типов, отличающиеся учетом поперечного и продольного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку, нелинейности кривой намагничивания ферромагнитных материалов и неравномерности распределения магнитного потока в воздушном зазоре. Разработанные ММ позволяют получить мгновенные значения напряжения, тока, мощности и составляющих ЭМС ЭГВПД продольного и комбинированного типов.

В результате экспериментальных исследований разработанного макета ЭГВПД продольного типа подтверждена адекватность линейной и нелинейной ММ ЭГВПД продольного типа. Сравнение экспериментальных и расчетных результатов показало, что их расхождение составляет 2,7–6,9 % [1, 3–5, 7, 9, 11, 20, 22, 23].

3. Разработан способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем ЭА с ЭГВПД. Отличительной особенностью предложенного способа является использование в электрической подсистеме ЭГВПД с поперечным и продольным изменением магнитного потока и управлением током в рабочей обмотке, что позволяет обеспечить непрерывное электромеханическое преобразование энергии на всем рабочем ходе и уменьшить удельную массу электрической подсистемы на 12–14 % с одновременным повышением КПД на 2,3–3,3 % [3, 9, 12, 28, 29, 32].

4. Получены новые, не описанные в литературе, закономерности:

– особенности влияния площади поперечного сечения МПр, ширины обмоточного окна и величины рабочего хода ЭГВПД продольного типа на изменения магнитных потоков рассеяния и выпучивания;

– особенности влияния площади поперечного сечения МПр и кинематических параметров (скорость, частота и координата перемещения) подвижной части ЭГВПД продольного и комбинированного типов на изменения ЭДС движения генераторов.

Предложена универсальная методика электромагнитного расчета магнитоэлектрических генераторов возвратно-поступательного движения. Отличительной особенностью предложенной методики является использование МКЭ для определения магнитных потоков, проходящих через рабочую обмотку генераторов, и ММ генераторов на основе уравнений

Кирхгофа и Пуассона для векторного магнитного потенциала. На основании разработанной методики электромагнитного расчета получены новые, не описанные в литературе, особенности влияния площади поперечного сечения МПр, числа витков рабочей обмотки, величины рабочего хода и активной мощности ЭГВПД продольного типа на изменения удельной массы и КПД [6, 8, 10, 20, 22, 23].

5. Разработана методика структурно-параметрического синтеза комбинированного ЭГВПД для АСЭС. Отличительной особенностью предложенной методики является использование в качестве целевой функции минимума удельной массы модульного КГ. Разработанная методика позволяет провести синтез КГ с минимальной удельной массой и заданным КПД. В разработанной методике используется комбинированный подход к электромагнитному расчету ЭГВПД [6, 15, 25–28].

6. Разработана ИМ системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД», отличающаяся учетом в ЭГВПД одновременного использования поперечного и продольного изменения магнитного потока, проходящего через рабочую обмотку. Разработанная ИМ позволяет проводить численные эксперименты с системой «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД», что обеспечивает сокращение сроков разработки ЭА на базе ЭГВПД [2, 9, 12–14, 17, 19].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты, полученные при выполнении диссертационного исследования, использованы: при разработке технического облика перспективных базовых мобильных быстроразвертываемых платформ и проработке технического облика перспективных комплексов автономного электроснабжения в ОАО «ВОЛАТАВТО», в НИР шифр «Полоса», инв. № 3042/17, выполненной в УО «ВА РБ» в интересах управления связи Генерального штаба Вооруженных Сил, а также в учебном процессе кафедры электротехники и систем электропитания УО «ВА РБ», что подтверждается актами, выданными соответствующими организациями. Кроме того, проведена оценка возможности использования результатов диссертационного исследования: для разработки перспективного источника электроэнергии АСЭС в ОАО «АГАТ–СИСТЕМ», при модернизации и изменении состава снаряжения групп сил специальных операций, для разработки ЭМПЭ возвратно-поступательного типа в ООО «ИнКата», о чем свидетельствуют справки, выданные соответствующими организациями.

Также полученные результаты могут быть рекомендованы для использования в проектных, научно-исследовательских, опытно-конструкторских и других организациях, занимающихся исследованием, разработкой и проектированием ЭМПЭ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1. Использование возвратно-поступательной схемы электрического генератора для повышения эффективности энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, А. Е. Каледа, О. В. Сидяко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2016. – № 4. – С. 108–114.

2. Применение короткоходовой схемы возвратно-поступательного электрического генератора для повышения механического КПД и эффективной мощности энергоустановок на базе свободнопоршневых двигателей / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, А. Е. Каледа, Е. В. Колчин // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 1. – С. 101–108.

3. Менжинский, А. Б. Применение возвратно-поступательного генератора комбинированной конструкции для повышения КПД и уменьшения удельной массы энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, И. В. Митянов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2017. – № 4. – С. 62–72.

4. Менжинский, А. Б. Разработка и анализ математических моделей генераторов линейного и возвратно-поступательного типов с электромагнитным возбуждением / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов // Изв. вузов. и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2018. – № 2. – С. 118–128.

5. Менжинский, А. Б. Математическая модель генератора комбинированной конструкции возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2018. – № 2. – С. 74–85.

6. Менжинский, А. Б. Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановок робототехнических комплексов на базе свободнопоршневого двигателя / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 2. – С. 229–243.

7. Менжинский, А. Б. Экспериментальная проверка адекватности математической модели возвратно-поступательного электрического генератора с электромагнитным возбуждением / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. В. Суходолов // Изв. вузов. и энергет. об-ний СНГ. Энергетика. – 2019. – № 2. – С. 168–176.

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 (233-234). – С. 38–48.

9. Менжинский, А. Б. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем и электрическим генератором возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 304–320.

10. Менжинский, А. Б. Исследование электромагнитных процессов в возвратно-поступательных электрических генераторах с продольным и комбинированным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, О. В. Сидяко, П. Б. Менжинский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та. – 2019. – № 4. – С. 45–59.

11. Экспериментальное исследование макета электромеханического преобразователя энергии возвратно-поступательного типа с продольным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский, П. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, О. В. Сидяко // Энергоэффективность. – 2020. – № 1 (267). – С. 24–29.

12. Менжинский, А. Б. Имитационная модель «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения» / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 83–96.

Статьи в других изданиях

13. Менжинский, А. Б. Перспективы применения свободнопоршневого двигателя внутреннего сгорания в системе электроснабжения автономного объекта / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций : сб. ст. по материалам VII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 28–29 апр. 2016 г. : в 2 ч. / Воронеж. ин-т Гос. противопожар. службы М-ва по чрезвычайн. ситуациям России ; редкол.: А. М. Гаврилов (пред.) [и др.]. – Воронеж, 2016. – Ч. 1. – С. 68–71.

14. Менжинский, А. Б. Применение активного выпрямителя с возвратно-поступательным генератором комбинированной конструкции для повышения эффективности энергоустановок автономных объектов / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Е. В. Колчин // Магистерский вестник : сб. науч. работ магистрантов и аспирантов / Ин-т подгот. науч. кадров НАН Беларуси ; редкол.: И. И. Ганчеренок (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 40–50.

15. 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-elektromehnicheskikh-preobrazovateley-energii/. – Дата доступа: 21.02.2020.

16. Менжинский, А. Б. Анализ структур электрических генераторов возвратно-поступательного движения [Электронный ресурс] / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, П. Б. Менжинский // Изобретатель Международный научно-технический журнал. – Режим доступа: <https://izobretatel.by/nauchnye-publikacii/analiz-struktur-elektricheskikh-generatorov/>. – Дата доступа: 27.03.2020.

Материалы конференций и тезисы докладов

17. Малашин, А. Н. Перспективы применения свободнопоршневого двигателя внутреннего сгорания в беспилотных летательных аппаратах / А. Н. Малашин, А. Б. Менжинский // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : IV Междунар. науч.-техн. конф., 15–16 мая 2014 г. : сб. тез. докл. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2014. – С. 204.

18. Менжинский, А. Б. Система электроснабжения автономного объекта на базе свободнопоршневого двигателя с линейным электрическим генератором / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Чрезвычайные ситуации: теория и практика : материалы докл. Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 22–23 мая 2014 г. / Гомел. инженер. ин-т М-ва по чрезвычайн. ситуациям Респ. Беларусь ; редкол.: И. И. Суторьма (науч. ред.) [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 244–245.

19. Малашин, А. Н. Перспективы применения свободнопоршневого двигателя в системе электроснабжения функционального оборудования автономного объекта / А. Н. Малашин, А. Б. Менжинский // Энергетическая безопасность Союзного государства : сб. материалов секции, 6–11 окт. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т [и др.]. – Минск, 2014. – С. 75–77.

20. Малашин, А. Н. Экспериментальная проверка адекватности математической модели перспективного генератора возвратно-поступательного движения / А. Н. Малашин, А. Б. Менжинский, А. А. Степанов, А. В. Степанов, А. Е. Ченцов // Проблемы создания и перспективы развития Единой (Объединенной) системы противовоздушной и противоракетной обороны ОДКБ : материалы Междунар. воен.-науч. конф., 1–2 апр. 2015 г. / Воен. акад. Воздушно-космической обороны им. Маршала Советского Союза Г. К. Жукова. – Тверь, 2015. – С. 271–277.

21. Менжинский, А. Б. Разработка единой энергоустановки для мобильных образцов вооружения на базе свободнопоршневого двигателя /

А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Актуальные проблемы военной науки и практики в современных условиях и пути их решения : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 23–24 апр. 2015 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2015. – С. 129.

22. Менжинский, А. Б. Анализ потенциальных возможностей генераторов линейного и возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Форум проектов программ Союзного государства. IV форум вузов инженерно-технологического профиля : сб. материалов форума, 9–14 нояб. 2015 г. / Беларус. нац. техн. ун-т [и др.]. – Минск, 2015. – С. 33–36.

23. Менжинский, А. Б. Экспериментальная проверка адекватности математической модели перспективной конструкции генератора возвратно-поступательного движения / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Проблемные вопросы развития системы противовоздушной обороны в современных условиях : материалы Междунар. воен.-науч. конф., 4–5 фев. 2016 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь [и др.]. – Минск, 2016. – С. 50–53.

24. Менжинский, А. Б. Использование свободнопоршневого двигателя для повышения эффективности энергоустановок автономных образцов вооружения / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, П. Б. Менжинский // Обеспечение военной безопасности государства: проблемы и перспективы : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф. учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Минск, 23–24 марта 2017 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2017. – С. 427.

25. Менжинский, А. Б. Параметрический синтез энергоустановки автономного объекта на базе возвратно-поступательного электрического генератора / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, П. Б. Менжинский // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. (70-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Б. М. Хрусталева, Ф. А. Романюк, А. С. Калиниченко. – Минск, 2017. – Т. 1. – С. 18.

26. Менжинский, А. Б. Методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора возвратно-поступательного типа для энергоустановки на базе свободнопоршневого двигателя / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. (71-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. работников, докторантов и аспирантов БНТУ) : в 4 т. / Беларус. нац. техн. ун-т ; редкол.: С. В. Харитончик, А. М. Маляревич, А. С. Калиниченко. – Минск, 2018. – Т. 1. – С. 23.

27. Менжинский, А. Б. Структурно-параметрический синтез генератора комбинированной конструкции для энергоустановки на базе свободно-поршневого двигателя / А. Б. Менжинский, Е. В. Колчин, А. Н. Малашин // Электроэнергетика. Энергия – 2018 : Тринадцатая междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : материалы конф., Иваново, 3–5 апр. 2018 г. : [в 6 т.] / Иван. гос. энергет. ун-т. – Иваново, 2018. – Т. 3. – С. 43.

28. Технический облик энергоустановки беспилотных летательных аппаратов на базе возвратно-поступательных электрических генераторов / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, И. Н. Шипицкий // Актуальные проблемы и перспективы развития авиации : сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф., учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Минск, 25–26 апр. 2018 г. : в 2 ч. / Белорусская государственная академия авиации ; сост.: А. В. Дубовский [и др.]. – Минск, 2018. – Ч. 2. – С. 60–62.

29. Менжинский, А. Б. Способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободно-поршневым двигателем на всем рабочем цикле / А. Б. Менжинский, Е. В. Колчин, А. Н. Малашин // Электромеханотроника и управление. Энергия – 2019 : Четырнадцатая всероссийская (междунар.) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых : материалы конф., Иваново, 2–4 апр. 2019 г. : [в 6 т.] / Иван. гос. энергет. ун-т. – Иваново, 2019. – Т. 4. – С. 35–36.

Патенты

30. Линейный генератор возвратно-поступательного движения : пат. 22842 Респ. Беларусь : МПК ; Н 02К 35/00 (2006) / Ю. В. Суходолов, А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Е. В. Колчин ; дата публ. 28.02.2020.

31. Устройство для получения электрической энергии при возвратно-поступательном движении : пат. 12236 Респ. Беларусь : МПК ; Н 02К 35/00 (2006) / А. Б. Менжинский, Ю. В. Суходолов, А. Н. Малашин, В. В. Майлычко, П. Б. Менжинский ; дата публ. 28.02.2020.

32. Комбинированный генератор возвратно-поступательного типа : пат. 12237 Респ. Беларусь : МПК Н 02К 35/00 (2006) / А. Б. Менжинский, Ю. В. Суходолов, А. Н. Малашин, А. Е. Каледа, П. Б. Менжинский ; дата публ. 28.02.2020.

РЭЗІЮМЭ

Менжынскі Андрэй Барысавіч

**ЭЛЕКТРЫЧНЫЯ ГЕНЕРАТАРЫ
ЗВАРОТНА-ПАСТУПАЛЬНАГА РУХУ ДЛЯ АЎТАНОМНАЙ
СІСТЭМЫ ЭЛЕКТРАЗАБЕСПЯЧЭННЯ**

Ключавыя словы: электрычны генератар, мадэляванне, свабоднапаршныя рухавік, методыка, электрамагнітны разлік, камбінаваны генератар, метады канчатковых элементаў.

Мэта працы: распрацоўка прынцыпаў рэалізацыі электрычных генератараў зваротна-паступальнага руху з папярочным і падоўжным змяненнем магнітнага патоку, а таксама методык электрамагнітнага разліку і структурна-параметрычнага сінтэзу для паляпшэння энергетычных і масагабарытных паказчыкаў.

Метады даследавання: метады тэорыі магнітных ланцугоў і палі, а таксама метады матэматычнага мадэлявання электрычных машын.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацаваны структуры электрычных генератараў зваротна-паступальнага руху. Навізна тэхнічных рашэнняў структур генератараў абаронена трыма патэнтамі Рэспублікі Беларусь. Распрацаваны матэматычныя мадэлі электрычных генератараў зваротна-паступальнага руху падоўжнага і камбінаванага тыпаў. Прапанаваны спосабы рашэння задачы ўзгаднення сіл механічнай і электрычнай падсістэм электраагрэгата з электрычным генератарам зваротна-паступальнага руху. Распрацавана методыка структурна-параметрычнага сінтэзу камбінаванага генератара, заснаваная на выкарыстанні ў якасці мэтавай функцыі мінімуму удзельнай масы модульнага камбінаванага генератара. Распрацавана імітацыйная мадэль сістэмы «свабоднапаршныя рухавік-электрамеханатроны пераўтваральнік на базе электрычнага генератара зваротна-паступальнага руху».

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы электрамеханічных пераўтваральнікаў энергіі зваротна-паступальнага руху.

Вобласць прымянення. Праектаванне і стварэнне электрамеханічных пераўтваральнікаў энергіі зваротна-паступальнага руху з палепшанымі энергетычнымі і масагабарытнымі паказчыкамі.

РЕЗЮМЕ

Менжинский Андрей Борисович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Ключевые слова: электрический генератор, моделирование, свободно-поршневой двигатель, методика, электромагнитный расчет, комбинированный генератор, метод конечных элементов.

Цель работы: разработка принципов реализации электрических генераторов возвратно-поступательного движения с поперечным и продольным изменением магнитного потока, а также методик электромагнитного расчета и структурно-параметрического синтеза для улучшения энергетических и массогабаритных показателей.

Методы исследования: методы теории магнитных цепей и поля, а также методы математического моделирования электрических машин.

Полученные результаты и их новизна. Разработаны структуры электрических генераторов возвратно-поступательного движения. Новизна технических решений структур генераторов защищена тремя патентами Республики Беларусь. Разработаны математические модели электрических генераторов возвратно-поступательного движения продольного и комбинированного типов. Предложен способ решения задачи согласования сил механической и электрической подсистем электроагрегата с электрическим генератором возвратно-поступательного движения. Разработана методика структурно-параметрического синтеза комбинированного генератора, основанная на использовании в качестве целевой функции минимума удельной массы модульного комбинированного генератора. Разработана имитационная модель системы «свободнопоршневой двигатель – электро-механотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения».

Рекомендации по использованию. Результаты исследования могут быть использованы при разработке электромеханических преобразователей энергии возвратно-поступательного движения.

Область применения. Проектирование и создание электромеханических преобразователей энергии возвратно-поступательного движения с улучшенными энергетическими и массогабаритными показателями.

SUMMARY

Menzhinsky Andrei

ELECTRIC RECIPROCATING GENERATORS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS

Keywords: electric generator, simulation, free-piston engine, method, electromagnetic calculation, combined generator, finite element method.

Research goal: development of principles for implementing electric reciprocating generators with transverse and longitudinal changes in magnetic flux, as well as methods for electromagnetic calculation and structural-parametric synthesis to improve energy and mass-dimensional indicators.

Research methods: methods of the theory of magnetic circuits and fields, as well as methods of mathematical modeling of electric machines.

Obtained results and novelty. The structures of electric generators reciprocating motions have been developed. The novelty of technical solutions of generator structures is protected by three patents of the Republic of Belarus. Mathematical models of electric reciprocating generators of longitudinal and combined types have been designed. A method for solving the problem of coordination the forces of the mechanical and electrical subsystems of an electric unit with an electric generator of reciprocating motion is proposed. A method of structural-parametric synthesis of a combined generator based on the use of the minimum specific mass of a modular combined generator as an objective function has been worked out. A simulation model of the system «free piston engine – electromechatronic Converter on the basis of the electric generator reciprocating motion» was developed.

Usage recommendations. The research results can be used in the development of Electromechanical reciprocating motions energy converters.

Application. Design and creation of Electromechanical reciprocating motions energy converters with improved energy and mass-dimensional indicators.

Научное издание

МЕНЖИНСКИЙ
Андрей Борисович

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ
ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
ДЛЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать 06.07.2020. формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,23. Тираж 85. Заказ 391.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.