

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента  
доктора технических наук, старшего научного сотрудника,  
**СИМОНОВА Бориса Ферапонтовича**  
на диссертацию **Мошкина Владимира Ивановича** на тему  
**«Импульсные линейные электромагнитные двигатели для техноло-  
гий с высококонцентрированными потоками энергии»**,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук  
по специальности: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

### **Актуальность избранной темы**

Многие технологические процессы в промышленности характеризуются повышенной температурой окружающей среды и стесненными производственными условиями. Для реализации таких технологических процессов с помощью импульсных ЛЭМД необходимо повышать их энергоэффективность, то есть повысить удельные энергетические и силовые показатели двигателя и его КПД. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего поиска путей и способов повышения удельных энергетических и силовых показателей импульсных ЛЭМД. Данные вопросы рассмотрены в работе Мошкина В.И., что показывает ее несомненную актуальность.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций,** сформулированных в диссертации, можно считать достаточной, так как они базируются на адекватном описании процессов электромагнитного и магнито-механического преобразования электрической энергии в импульсном линейном электромагнитном двигателе, корректном математическом представлении и решениях с использованием методов теории электрических и магнитных цепей, основных положений электромеханики, метода конечных элементов.

### **Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность результатов и отдельных положений диссертации подтверждается применением апробированных методов и удовлетворительной сходимостью результатов теоретических, экспериментальных исследований и математического

моделирования разработанных импульсных линейных электромагнитных двигателей и машин, а также совпадением отдельных результатов с данными других авторов.

В процессе выполнения работы автором получены следующие новые научные результаты:

- определены оптимальные геометрические параметры цилиндрического ЛЭМД с двумя рабочими зазорами исходя из минимума объема активных материалов;

- теоретически и экспериментально обоснованы условия укорочения длины магнитной системы импульсных ЛЭМД продольного и поперечного поля;

- теоретически обоснован и практически подтвержден факт уменьшения энергии удара импульсного ЛЭМД в случае ввода сторонней механической энергии в электромеханическую систему при совпадении направлений тягового усилия и скорости движения якоря;

- выявлено влияние режимных и конструктивных параметров ударной машины с известным однообмоточным ЛЭМД и возвратной пружиной на его предельную ударную мощность, для ее повышения предложен разработанный двухобмоточный двигатель.

- впервые установлены области допустимых сочетаний геометрических параметров элементов магнитных систем интегрированного ЛЭМД;

- разработаны на уровне изобретений конструкции импульсных ЛЭМД с двумя рабочими зазорами, имеющие повышенные в сравнении с известными удельные силовые и энергетические показатели;

- разработаны на уровне изобретений устройства питания и управления (УПУ) ЛЭМД, обеспечивающие надежную и экономичную работу с регулированием энергии удара и частоты ходов, а также стабилизацию энергии удара при изменении напряжения источника.

Новизна диссертационной работы Мошкина В.И. также заключена в выявленных энергоэффективных режимах импульсного ЛЭМД и соотношении между его интегральной механической работой и энергией рабочего хода; в предложенном

новом способе передачи дополнительной магнитной энергии потоков рассеяния в рабочие зазоры импульсного ЛЭМД, конструкция которого защищена двумя изобретениями, позволяющем повысить его механическую энергию на 30–35%.

### **Достоверность и новизна выводов и рекомендаций диссертации**

**Первый вывод**, в котором установлены требования к значениям механической энергии и частот воздействия для широкого спектра технологических процессов, основан на анализе литературных источников, патентном поиске, результатах производственного опыта и проведённых научных исследований и представляется достоверным и новым.

**Второй, третий и четвёртый выводы**, устанавливающие области допустимых сочетаний геометрических параметров элементов магнитных систем интегрированного ЛЭМД на основе общего магнитопровода, определяющие оптимальные геометрические параметры и соотношения основных размеров МС ЛЭМД по критериям «удельная интегральная механическая работа» и «удельное тяговое усилие», достоверны, базируются на аналитической оценке, подтверждены математическим моделированием, экспериментами и используются другими исследователями.

**Пятый и шестой выводы** достоверны и конкретны и содержат ценную информацию об обобщенном конструктивно-режимном параметре  $\Theta_n$ , определяющем значения основных выходных параметров ЛЭМД (энергии и усилия) и позволяет обосновать конструктивную схему ЛЭМД на этапе предварительного проектирования.

**Седьмой вывод** о впервые детально рассмотренных 16 энергетических режимах, отличающихся степенью восстановления магнитной энергии рабочих зазоров импульсного ЛЭМД при движении якоря, достоверен и базируется на аналитической оценке.

**Восьмой вывод** об основных электромеханических характеристиках ЛЭМД продольного магнитного поля для эффективных энергетических режимов при различных состояниях магнитных систем, конкретен, достоверен и базируется на аналитической оценке.

*Девятый вывод* о разработанных методах проектного расчета ЛЭМД для широкого диапазона тяговых усилий, энергий и частот воздействия на технологический объект достоверен, используется другими исследователями; новизна подтверждена патентами РФ на изобретение.

*Десятый вывод* о способе передачи дополнительной магнитной энергии в рабочие зазоры импульсного ЛЭМД, достоверен, что подтверждено математическим моделированием. Способ защищен патентами РФ на изобретение.

*Одиннадцатый вывод* о схемных и конструктивных решениях технологического оборудования с однообмоточными ЛЭМД, обладающих повышенными динамическими, силовыми и энергетическими показателями, развивает положения девятого и десятого выводов; достоверность и новизна подтверждаются патентами на полезные модели электромагнитных машин. Их достоверность подтверждается актами внедрения, производственных испытаний машин с ЛЭМД.

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов** заключается:

- в использовании эффективных энергетических режимов импульсного ЛЭМД, позволяющих увеличить его удельную механическую работу (энергию удара) в два и более раза;

- в разработке новых конструкций магнитных систем ЛЭМД: с укороченной длиной магнитной системы продольного и поперечного поля, с ферромагнитным направляющим корпусом, с встроенным в магнитную систему устройством удержания якоря, позволяющие в 1,5...2 раза повысить удельные значения тягового усилия и механической энергии двигателей, расширить их функциональные возможности и область применения;

- в определении областей допустимых изменений параметров импульсных ЛЭМД, исключающих их влияние на питающую сеть;

- в разработке инженерных методик определения геометрических размеров ЛЭМД продольного магнитного поля с заданными полезной работой и тяговым усилием;

- в разработке и испытании в лабораторных и производственных условиях различных конструкций импульсных ЛЭМД и созданных на их основе электромагнитных машин для различных технологий, защищенных патентами на изобретения.

### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

В работе приведены результаты фундаментальных научных исследований энергопреобразования в импульсных ЛЭМД. В частности, была использована научная гипотеза о соотношении между энергией удара  $A_y$  и интегральной работой  $A_{\text{и}}$  электромагнитного двигателя (теорема взаимности), что позволило создать инженерную методику предварительного расчета импульсного ЛЭМД, исходя из заданной энергии рабочего хода; сравнить на этапе проектирования различные конструктивные схемы однообмоточных импульсных ЛЭМД по энергетическим и динамическим параметрам; выявить нежелательные режимы, вызывающие снижение энергии рабочего хода якоря.

Решена комплексная задача, имеющая важное значение для развития теории электромеханического преобразования энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях, применяемых в различных технологиях.

Разработанные машины и оборудование с импульсными ЛЭМД, обладающие повышенными удельными силовыми и энергетическими показателями, рекомендованы к внедрению в машиностроении, литейном и металлургическом производствах, строительстве, на железнодорожном транспорте, на операциях локального вытеснения металла при наплавке (сварочные производства промышленных предприятий), на операциях терморезания при восстановлении железнодорожных колесных пар (может быть рекомендовано таким предприятиям, как НПК «Уралвагонзавод», г. Н. Тагил и вагоноремонтный цех ШААЗ, г. Шадринск) и других подобных операциях;

Разработанные методы проектирования и моделирования импульсных ЛЭМД продольного и поперечного поля могут быть внедрены в учебный процесс в виде научных монографий и учебных пособий по дисциплинам «Введение в специаль-

ность», «Электрические машины», « Преобразовательная техника в электроприводе», «Электротехнологические промышленные установки» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

### **Оценка содержания диссертации, ее завершенность**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 233 наименований и приложения. Материал работы изложен на 361 странице, включая 125 рисунков и 14 таблиц.

**Автореферат** представляет краткое изложение материала диссертации, в последовательности, соответствующей основной работе; его содержание и выводы не имеют отклонений от приведенных в диссертации.

**Во введении** дана краткая характеристика рассматриваемой проблемы, обосновывается актуальность и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** определены классификационные признаки импульсных технологий, использующих механическую энергию, рассмотрены импульсные технологические процессы и их основные параметры, проанализированы эффекты импульсных механических воздействий, определены предельные показатели линейных приводов. На основе сравнительного анализа энергопреобразования выявлено преимущество в общем КПД для привода с импульсным ЛЭМД, установлены требования к значениям механической энергии и частот воздействия для широкого спектра технологических процессов, реализуемых ЛЭМД: механическая энергия  $1...5 \cdot 10^4$  Дж, частоты  $0,1...100$  Гц, доказана возможность использования ЛЭМД в составе оборудования для удовлетворения требований импульсных технологий.

**Вторая глава** посвящена оптимизации геометрических параметров магнитной системы (МС) цилиндрических импульсных ЛЭМД с интегральными функциями: с двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем, с неферромагнитным направляющим корпусом (НФНК) и ферромагнитным (ФНК). Был сформулирован общий для этих МС принцип – принцип укорочения, на основе которого осуществляется повышение удельных силовых показателей импульсных ЛЭМД на 30...50%

при соответствующей коррекции ПВ двигателя. Для интегрированного ЛЭМД установлены области допустимых сочетаний площади поперечного сечения верхнего магнитного шунта и удерживающей поверхности, а также границы изменения магнитной индукции в ярме двигателя в момент отрыва якоря.

**В третьей главе** рассмотрена энергетическая структура электромеханического преобразователя (ЭМП) электромагнитного типа циклического действия, представленная тремя последовательно включенными подсистемами (ПС): электрической ПС, магнитной ПС и механической ПС и показана необходимость концентрации в рабочих зазорах магнитной энергии на этапе ее электромагнитного преобразования.

Впервые в электромеханическом преобразователе электромагнитного типа структурно разделены потоки энергий как между электрической и магнитной, так и между механической и магнитной подсистемами. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена необходимость начала рабочего хода импульсного ЛЭМД лишь после предварительного накопления на этапе трогания необходимой магнитной энергии. Показано, что при изменении обобщенного режимно-конструктивного параметра  $\Theta_n$ , например, от  $45^\circ$  до  $20^\circ$ , максимально возможная величина накопленной на этапе трогания магнитной энергии возрастает в 3,6 раза.

В главе установлено, что предельная механическая работа в виде магнитной энергии, накопленной в рабочих зазорах ЛЭМД, зависит от степени насыщения материала магнитопровода и начальной индуктивности  $L_H$ . Для редкоударных электромагнитных машин выявлены преимущества способа статического нагружения двигателя перед способом его форсированного питания.

**В четвертой главе** исследуются режимы электромеханического преобразования. Получены в обобщенном виде количественные соотношения между электрической, магнитной и механической энергиями при их взаимном преобразовании для энергетических режимов импульсных электромеханических преобразователей электромагнитного типа с ненасыщенной магнитной системой, включая двигательный и генераторный режимы, а также двигательный режим, совмещенный с генераторным, и генераторный режим, совмещенный с двигательным.

Выявлены энергетические режимы, обеспечивающие высокую стабильность энергии удара. Реализация энергетического режима с неизменным потокосцеплением ( $\Psi = \text{const}$ ) повышает быстродействие электромагнитного привода за счет снижения времени рабочего хода до 80% по сравнению с режимом при неизменном токе ( $I = \text{const}$ ).

Определены диапазоны изменения обобщенных конструктивного и режимного параметров импульсных электромеханических преобразователей, в которых механическая работа преобразователя максимальна.

*Пятая глава* посвящена расчету параметров импульсных ЛЭМД на основе принципа взаимности, являющегося одним из обобщенных методов научного познания физических процессов в динамических системах. По этому принципу в качестве исходных данных используются статические тяговые характеристики  $F_{\text{ст}}(\delta)$  импульсного ЛЭМД, противодействующие характеристики  $F_{\text{п}}(\delta)$  для определения энергии удара ЛЭМД по его интегральной работе  $A_{\text{и}}$  и работе  $A_{\text{п}}$  по преодолению полезной нагрузки. Впервые получено обобщенное соотношение между энергией рабочего хода и интегральной работой применительно к каждому энергетическому режиму, по которому работает импульсный ЛЭМД.

Определены границы области минимального статического тягового усилия, обеспечивающего эффективный двигательный режим для конструктивных схем молота двойного действия и многосекционной машины в период рабочего хода.

На основе соотношений принципа взаимности получены и проанализированы основные энергетические и динамические параметры конструктивных схем однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной. Установлено, что производительность и ударная мощность однообмоточных ЛЭМД с возвратной пружиной в значительной степени зависят от времени холостого хода. При заданных энергии удара, тяговом усилии и жесткости возвратной пружины существует предельная частота ходов якоря ЛЭМД и соответствующий ей максимум ударной мощности машины. Дальнейшее повышение частоты ходов влечет за собой снижение энергии удара. Выявлена предпочтительность конструктивной схемы однообмоточного ЛЭМД с пружинным накопителем по энергетическим характеристикам и их стабильности.



*В шестой главе* рассмотрены рабочие процессы импульсных ЛЭМД с повышенными силовыми и энергетическими показателями для технологий с высококонцентрированными потоками энергии.

Нагружение импульсного ЛЭМД в приводе редкоударных машин позволяет увеличить удельную энергию удара до 9 Дж/кг и выше и его КПД в 2 и более раза.

Предложен способ передачи дополнительной магнитной энергии, обусловленной полями рассеяния магнитной системы двигателя, в его рабочие зазоры. Перераспределение значительной части магнитной энергии, связанной с полями рассеяния импульсного ЛЭМД и его устройства удержания, позволяет увеличить механическую энергию рабочего хода на 30-35%.

Установленная связь между частотой ходов якоря и продолжительностью включения двигателя позволяет по экспериментальным динамическим характеристикам машины определить предельную частоту ходов.

*В седьмой главе* рассмотрены конструктивные и схемные решения технологического оборудования с ЛЭМД. Автором предложены импульсные ЛЭМД для ресурсосберегающих технологий, среди которых доминируют процессы плазменной (дуговой) наплавки обработки по принципу безотходного терморезания, например, при восстановлении колесной пары железнодорожного вагона.

Показано, что машины, выполненные по конструктивной схеме однообмоточного импульсного ЛЭМД с возвратной пружиной, значительно проигрывают машинам, выполненным по конструктивной схеме однообмоточного импульсного ЛЭМД с пружинным накопителем по величине энергии удара и ударной мощности при одной и той же жесткости пружин, однако, на 15...25 % превосходят по частоте ходов.

Обоснованы рациональные способы регулирования выходных параметров импульсных ЛЭМД за счет изменения длительности и частоты питающих импульсов с помощью разработанных УПУ для ЛЭМД с полезной работой до 1000 Дж, частотой ходов до 600 мин<sup>-1</sup>, работающих в режимах одиночных и непрерывных ходов. Устройства обеспечивают возможность стабилизации энергии удара с откло-

нением её на 2...5% от среднего значения при изменении напряжения сети  $U_c$  в диапазоне  $\pm 10\%$  от номинального значения.

Обоснованы области допустимой работы ЛЭМД, исходя из заданного уровня колебаний напряжения, вызванного работой линейного электромагнитного привода, при питании его через вентильные преобразователи от электрических сетей промышленных предприятий и силовых трансформаторов.

### **Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации в целом**

Рецензируемая диссертация написана грамотным литературным языком с использованием общепринятой технической терминологии. Материал работы обладает полнотой, представляется логически выстроенным и завершенным. Замечаний по оформлению диссертации нет. Работа имеет внутреннее единство, материал логически выдержан и представляется завершенным. Автореферат раскрывает основные положения работы, а опубликованные по теме диссертации 81 публикация полно отражают ее основное содержание.

### **Замечания**

1. В работе детально подтверждены эффективные энергетические режимы импульсного ЛЭМД, имеющий высокий магнитный КПД (например, режим с неизменным потокосцеплением  $\Psi = \text{const}$  при движении якоря). Но в дальнейшем не показано, как этот режим реализовать.

2. В главе 4 получены и исследуются несколько электромеханических характеристик импульсного ЛЭМД продольного магнитного поля для различных энергетических режимов, а именно зависимости тока  $i$ , тягового усилия  $F$ , скорости перемещения  $V$  и механической ударной мощности  $P$  от величины перемещения  $x$  якоря. Не совсем понятно возможно ли на основе работы автора получить зависимость скорости перемещения от тягового усилия, т.е. механическую характеристику  $V(F)$  электромагнитного двигателя?

3. В главе 5, применив теорему взаимности для электромеханических систем, автор получил важный научный результат, по которому энергия удара  $A_y$  при совпадении направлений тягового усилия двигателя и скорости его якоря падает, что в ра-

боте доказано и проиллюстрировано (рисунки 5.9, 5.14). Однако не ясно: во-первых- относится ли этот вывод ко всем импульсным ЛЭМД или только к конструкциям, рассмотренным автором; во-вторых - возможно ли устранить такое уменьшение?

4. Требуется дополнительное пояснение вывода о том, что «реализация энергетического режима с неизменным потокосцеплением ( $\Psi = \text{const}$ ) повышает быстродействие электромагнитного привода за счет снижения времени рабочего хода до 80% по сравнению с режимом при неизменном токе ( $I = \text{const}$ )».

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы.

### Заключение

Диссертация Мошкина Владимира Ивановича является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие электромеханики как науки, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 - Электромеханика и электрические аппараты.

### Официальный оппонент

Зав. лабораторией силовых электромагнитных импульсных систем ИГД СО РАН,  
д.т.н. академик РАЕН.  
Докт. дис-я защищена по специальностям  
05.09.01., 05.05.04.

Б.Ф.Симонов.

22.02.2018 г.

630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54  
тел. +7 9  
e-mail: [Simonov\\_BF@mail.ru](mailto:Simonov_BF@mail.ru)

Подпись Симонова Б.Ф. заверяю  
Ученый секретарь ИГД СО РАН, к.т.н.

А.П.Хмелинин.