

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, доцента

Певчева Владимира Павловича

на диссертационную работу **Мошкина Владимира Ивановича**

"Импульсные линейные электромагнитные двигатели для

технологий с высококонцентрированными потоками энергии",

представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Мошкина В.И. посвящена проблеме совершенствования импульсных электромагнитных двигателей для приводов возвратно-поступательного движения, предназначенных для технологических процессов в сварочном производстве, приборостроении, машиностроении, энергетике, сельском хозяйстве и др. Как известно, импульсные электромагнитные двигатели сочетают конструктивную простоту и надежность. Эти двигатели без использования механических согласующих устройств наилучшим образом согласуются с рабочими органами в обширной группе приводов, в которых предполагается такой вид движения.

Исследуемые в работе электромагнитные двигатели по существу представляют разновидность электромеханических преобразователей энергии с линейным возвратно-поступательным движением, работающих в импульсном режиме. В связи с импульсным подводом энергии возникает комплекс проблем, связанных с достижением требуемого уровня удельной энергии удара, ограниченностью применения, особенностями энергопреобразования и регулирования выходных параметров.

Работа выполнялась в рамках ряда федеральных и ведомственных научно-технических программ.

Считаю, что тема диссертации Мошкина В.И., посвящённая повышению удельных силовых характеристик импульсных электромагнитных двигателей и созданию на их основе приводов для реализации ряда технологических процессов, представляется актуальной, имеющей значение для науки и прак-

тики и соответствует специальности 05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты».

Новизна проведённых исследований и полученных результатов

В первой главе приведён достаточно полный и объективный аналитический обзор классификационных признаков импульсных технологических процессов в следующих областях: в машиностроении, литейном производстве, строительстве, швейной и химической промышленности, сейсморазведке, сельском хозяйстве, электротехнологиях и специальных работах. Представлены диапазоны энергии механического воздействия и частоты следования воздействий. Рассмотрены эффекты, характерные для импульсных способов подвода энергии к технологическому оборудованию: эффекты увеличения импульсной мощности и её концентрации, изменения амплитуды силы и скорости ввода энергии в рабочую зону, а также возможности управления концентрацией энергии и волновые эффекты.

Далее рассмотрены классификационные признаки известных линейных приводов различных машин: механических, пневматических, гидравлических, электромеханических и приводов с различным их сочетанием с точки зрения диапазонов рабочих скоростей, перемещений, КПД основного преобразователя энергии, тяговых и удельных усилий. Предложен вариант критерия для сравнения приводов на основе общего КПД всех звеньев привода при ограничителе в виде удельного усилия на единицу собственной массы.

В начале второй главы диссертации представлены результаты оптимизации основного геометрического соотношения размеров для цилиндрических электромагнитных двигателей со сплошным магнитопроводом, двумя рабочими зазорами и комбинированным якорем – отношения длины обмотки к радиусу втяжной части якоря, при заданных интегральной работе в импульсе, превышении температуры обмотки и продолжительности включения.

Автором получено в аналитической форме выражение для критерия оптимизации исследуемого электромагнитного двигателя в виде отношения интегральной работы к объёму активных материалов, учитывающее магнитный

цикл работы электромагнита при полиномиальной аппроксимации кривой намагничивания магнитопровода, а также тепловой баланс его обмотки.

Проведенные автором расчёты показали, что при заданном значении интегральной работы существует оптимальное значение радиуса втяжной части якоря. Установлено влияние отклонения этого радиуса от оптимального на объёмы активных материалов электромагнита. Представлены выражения для расчёта оптимальных значений базисных геометрических параметров – радиуса якоря и длины обмотки, с которых рекомендовано начинать проектный расчёт электромагнитного двигателя. Полученные данные подтверждены экспериментальными данными на гамме импульсных электромагнитных двигателей для прессового оборудования.

Далее приведены результаты исследования возможности увеличения удельного тягового усилия при одном и том же объёме активных материалов за счёт "укорочения" магнитной системы и увеличения плотности тока в обмотке. Исследование показало, что при заданном значении рабочего хода и "укорочении" магнитной системы вдвое тяговое усилие увеличивается приблизительно на 50%. Эти данные подтверждены экспериментальными данными на гамме импульсных электромагнитных двигателей. Влияние "укорочения" также проанализировано на примере электромагнитного двигателя с движением якоря, поперечным направлением магнитного поля в рабочем зазоре. Результаты исследования для этой магнитной системы оказались близкими к полученным для двигателя с продольным полем.

Также во второй главе приведены результаты исследования конструктивных параметров устройства удержания якоря цилиндрического электромагнитного двигателя, у которого направляющий корпус выполнен ферромагнитным, в отличие от известных, направляющие корпуса которых выполнялись неферромагнитными, и шунтирует верхний рабочий зазор на этапе трогания. Благодаря этому основной магнитный поток, проходя по направляющему корпусу, создает удерживающее усилие между поверхностями этого корпуса и верхней частью якоря. Оригинальность конструкции заключена

в том, что удерживающее усилие создается не МДС обмотки удержания, а общей МДС, что делает конструкцию магнитной системы еще более простой. Исследовано их влияние на усилие удержания, условия отрыва и регулировочные свойства такого двигателя. Для подтверждения результатов исследования было использовано конечноэлементное моделирование и выполнен численный эксперимент.

В третьей и четвертой главах диссертации представлено исследование режимов электромагнитного и электромеханического преобразования энергии. Для представленного совокупностью электрической, магнитной и механической подсистем электромагнита рассмотрены 8 генераторных и 8 двигательных режимов работы.

В третьей главе исследованы режимы только электромагнитного преобразования, в четвертой - остальные. Обоснована теоретически и подтверждена экспериментально необходимость накопления значительной магнитной энергии на этапе трогания. Получено выражение для предельной величины магнитной энергии, которую возможно преобразовать в механическую, позволяющее оценить влияние материала магнитопровода и степени его насыщения. Проведена оценка двух способов накопления магнитной энергии при подключении обмотки к источнику постоянного напряжения: за счёт изменения тока трогания или напряжения питания. Выявлено преимущество первого способа. Показана связь необходимой накапливаемой на этапе трогания магнитной энергии с конструктивным и режимным параметрами.

В четвертой главе проведено сравнение режимов электромеханического энергопреобразования по механической работе, магнитному КПД и остаточной магнитной энергии. Хотя необходимую механическую работу можно получить в любом из указанных режимов электромеханического энергопреобразования, но для электромагнитов способ их реализации при заданной конечной энергии в магнитной системе предпочтительнее по сравнению с их реализацией при заданной начальной энергии. Показано, что при заданной величине остаточной магнитной энергии в цикле с постоянством потокосце-

пления механическая работа больше, чем в цикле с постоянством энергии в корень квадратный от кратности изменения индуктивности (m) раз, и в m раз по сравнению циклом с постоянством тока, и это подтверждено экспериментально. При одном и том же значении тока трогания и ненасыщенной магнитной системе режимы с постоянством потокосцепления с постоянством тока меняются местами, но реализовать преимущество режима постоянства тока на практике невозможно, поскольку магнитопровод насыщается.

Показано также, что при функционировании электромагнитного двигателя по комбинированному циклу: сначала с постоянством тока, а затем с постоянством потокосцепления, имеется возможность значительно снизить потери мощности в обмотке по сравнению с режимом постоянства потокосцепления при незначительном по сравнению с ним уменьшении механической работы. Дана привязка этого цикла к реальным. Также для режимов постоянства тока, мощности и потокосцепления и различных значений кратности изменения индуктивности получены зависимости относительных тока, силы тяги, скорости движения якоря и механической мощности от положения якоря.

В пятой главе рассмотрены потоки энергии в мощных многосекционных электромагнитных молотах, с характерным для них проявлением генераторных режимов энергопреобразования.

Также здесь рассмотрены динамические режимы работы двухзазорных электромагнитных двигателей с комбинированным якорем и пружинной нагрузкой. Разработаны инженерные методики проектного расчёта такого двигателя на заданную полезную работу, а также на заданное тяговое усилие.

В шестой главе рассмотрены рабочие процессы в электромагнитных двигателях с двумя зазорами и комбинированным якорем с учётом нагрузки, регулируемого аккумулирования магнитной энергии и использования энергии, запасённой в удерживающем устройстве и полях рассеяния и др. Установлено, что при перераспределении магнитной энергии, связанной с полями рассеяния и удерживающим устройством, в рабочий зазор механическая

энергия электромагнитного двигателя может быть повышена на 30–40%, причём реализуется это перераспределение теми же средствами, что и приближение режима работы к постоянству потокосцепления – шунтированием обмотки диодом.

Седьмая глава посвящена сравнению конструктивных схем технологического оборудования с электромагнитными приводами по нескольким критериям. Представлены перспективные схемы электромагнитных машин.

Также здесь описаны устройства питания и управления, реализующие несколько способов регулирования выходных параметров электромагнитного двигателя: плавным и ступенчатым изменением амплитуды и длительности импульса напряжения на обмотке и стабилизации энергии рабочего хода при изменении напряжения источника питания. Проанализирована специфика импульсных электроприводов, заключающаяся в их влиянии на колебания напряжения сети электропитания.

Таким образом, цель диссертационной работы автором была достигнута. К числу наиболее существенных результатов диссертации следует отнести:

1. Анализ режимов электромеханического энергопреобразования в импульсных электромагнитных двигателях, а также разработанные энергетические критерии для определения эффективности вебер-амперных циклов.
2. Разработку методик проектирования импульсных электромагнитных двигателей с двумя рабочими зазорами по заданным тяговому усилию или механической энергии.
3. Исследование влияния уровня аккумулируемой в рабочих зазорах на этапе трогания магнитной энергии и реализующих это аккумулирование устройств удержания и электропитания на характеристики импульсных электромагнитных двигателей.

Личный вклад автора состоит в анализе электромагнитных и электромеханических процессов в импульсных электромагнитных двигателях возвратно-поступательного движения, разработке и внедрении электромагнитных приводов с повышенной энергией удара: двухобмоточного электромагнитно-

го двигателя с активным возвратом якоря и однообмоточного – с укороченной магнитной системой. Также им предложены методики проектирования электромагнитных двигателей по заданным тяговому усилию или механической энергии.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений

Адекватность математических моделей исследуемых электромагнитных двигателей вытекает из физически обоснованных исходных допущений, корректного применения общей теории электрических и магнитных цепей, теории электрических машин и электромагнитного поля, апробированных методов оптимизационного проектирования.

Полученные в работе результаты теоретических исследований проверены экспериментально. Погрешность расчётов в пределах допустимого.

Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

Результаты диссертационной работы представляют научно обоснованную техническую разработку, имеющую значение для развития теории специальных электрических машин и совершенствования методов их проектирования. С использованием рекомендаций автора разработан ряд электромагнитных приводов различного технологического назначения. Разработанные математические модели и рекомендации по проектированию могут быть использованы в учебных программах профессиональных учебных учреждений, ведущих подготовку инженеров-электромехаников.

Замечания по диссертационной работе в целом

1. Не ограничен круг магнитных систем, для которых справедливы результаты проведённых исследований.
2. Не понятен использованный в автореферате и диссертации термин «трёхзазорный» электромагнитный двигатель. В «двухзазорном» электромагнитном двигателе рабочий магнитный поток замыкается последовательно через два зазора, и это количество максимальное для магнит-

ных систем с движением якоря вдоль магнитного потока.

3. В седьмой главе ряд устройств питания и управления, реализующих различные способы управления, описан текстом, без схем, приведены лишь две принципиальных схемы.
4. Не приведено количественных данных о влиянии нижнего шунта – штока на тяговое усилие и величину потерь магнитной энергии. Хотя не учитываемое в анализе тяговое усилие от потоков рассеяния может компенсировать его снижение в зоне нижнего зазора, эти величины неодинаковы. С учётом повышенного магнитного сопротивления в зоне подшипника влияние нижнего шунта и потоков рассеяния не может быть убрано из рассмотрения. Не приведено данных о применении штока из неферромагнитного материала.
5. В 4 главе диссертации в формуле (4.34) и на странице 19 автореферата для индуктивности импульсного электромагнитного двигателя $L(x) = a/(x_k - x + \delta_0(m))$ не пояснена роль $\delta_0(m)$ в знаменателе.
6. Из п. 6.2 не ясно, в каком соотношении находятся передаваемые в рабочие зазоры импульсного электромагнитного двигателя магнитная энергия, накопленная в устройстве удержания якоря, и магнитная энергия, обусловленная потоками рассеяния обмотки двигателя.
7. Раздел 7.1.1. по содержанию больше соответствует первой главе.
8. В диссертации имеется ряд неточностей (стр.45,64,68,75,85,170,222,291, 305), в некоторых случаях автор не даёт пояснений о том, что означает та или иная переменная в приводимых им выражениях, ограничиваясь ссылкой на первоисточник. Неполные данные не позволяют проверить полученные выводы.

Общая характеристика диссертационной работы

В целом, несмотря на отмеченные замечания, диссертация Мошкина В.И. выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на акту-

альную тему. Результаты работы представляют весомый вклад в развитие теории и практики электромагнитных двигателей, имеющих значение для развития теории специальных электрических машин и усовершенствование методов их проектирования.

Диссертация написана ясным языком с использованием правильных технических терминов. Автореферат полностью отражает её содержание.

Основные результаты диссертации за 25 лет работы над ней прошли достаточную апробацию более чем на 20 научно-технических конференциях, в том числе с международным участием, и опубликованы в 81 печатной работе, из которых 19 статей в изданиях по списку ВАК, 4 монографии и 14 объектов интеллектуальной собственности. Анализ публикаций автора позволяет утверждать, что содержание диссертации отражено в них с требуемой Положением ВАК полнотой. Содержание автореферата соответствует диссертации.


Учитывая актуальность выполненных исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов, считаю, что представленная диссертационная работа соответствует специальности 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты и всем требованиям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор – Мошкин Владимир Иванович заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по этой специальности.

Официальный оппонент, д.т.н. доцент,
профессор кафедры "Промышленная
электроника" ФГБОУ ВО «Тольяттин-
ский государственный университет»

445667. г.Тольятти, ул.Белорусская, 14,
Тел. (8482539203,
E-mail: V.Pevchev@tltsu.ru

Подпись заверяю
Учёный секретарь Учёного совета
ФГБОУ ВО «Тольяттинский государст-
венный университет»,
к.и.н., доцент



 В. П. Певчев
05 марта 2018 г.

 Т. И. Адаевская