

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Конохова Дмитрия Владимировича «Энергоэффективное прямое управление моментом асинхронных тяговых электродвигателей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Актуальность темы исследования

Применение асинхронных тяговых двигателей (АТД) для электроподвижного состава железных дорог является весьма актуальным и перспективным направлением развития электрической передачи электровозов и тепловозов. Использование асинхронных тяговых электроприводов в электрической тяге локомотивов позволяет значительно повысить их тяговые характеристики, надежность, а также ресурс в сравнении с традиционными коллекторными машинами.

Благодаря динамичному развитию силовой электроники и микропроцессорной техники открываются широкие перспективы совершенствования систем управления тяговым электроприводом с асинхронными двигателями, однако на сегодняшний день реализованы не все возможности энергосбережения средствами управления электроприводом. В связи с этим, автором в своем диссертационном исследовании решена актуальная задача повышения энергетической эффективности частотно-регулируемых тяговых электроприводов локомотивов с асинхронными двигателями посредством оптимизации алгоритмов системы прямого управления моментом по критерию минимума тока статора.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Соискатель провел подробный анализ существующих решений повышения энергоэффективности электроприводов с асинхронными

двигателями. Автор обосновал и осуществил выбор системы прямого управления моментом для асинхронных тяговых электродвигателей, позволяющую повысить эффективность работы тягового электропривода локомотивов.

Все научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные соискателем, имеют экспериментальное подтверждение как на комплексной компьютерной модели, так и на лабораторной установке. Результаты диссертационных исследований обсуждены на научных конференциях, опубликовано 19 работ по теме диссертации, 4 из которых в издательствах, рецензируемых ВАК, получено 4 патента на полезную модель и 3 патента на изобретение. Данные работы отражают основные положения диссертационного исследования автора.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность научных результатов диссертационного исследования обеспечивается грамотным теоретическим обоснованием и экспериментальной проверкой на лабораторной установке предложенных принципов энергоэффективного прямого управления моментом асинхронного двигателя.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- 1) разработан способ энергоэффективного прямого управления моментом асинхронного тягового двигателя;
- 2) предложен вариант оптимизации алгоритмов системы прямого управления моментом асинхронного двигателя по критерию минимума тока статора, реализующий оптимальное регулирование потокосцепления статора в зависимости от текущего задания электромагнитного момента.
- 3) разработана методика расчёта оптимальной зависимости задания потокосцепления статора и угла между моментобразующими векторами от задания на момент асинхронного двигателя, основанная на положениях теории

электрических машин;

4) определены оптимальные по критерию минимума тока статора аналитические зависимости потокосцепления и угла между моментобразующими векторами потокосцепления и тока статора от задания момента двигателя для АТД тепловозов.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

В диссертации разработан и теоретически обоснован энергосберегающий алгоритм регулирования асинхронного электропривода с прямым управлением моментом, позволяющий снизить потребление тока статора от источника электроэнергии, предложен вариант построения энергоэффективной системы управления электроприводом локомотива с асинхронными тяговыми двигателями, включающей в себя блок логики, учитывающий текущий режим работы тягового электропривода локомотива.

Разработанная соискателем компьютерная модель асинхронного тягового электропривода локомотива с системой прямого управления моментом является удобным инструментом для исследования вариантов повышения энергоэффективности и анализа процессов, протекающих в электрической и механической подсистемах электропривода.

Полученные для АТД тепловозов аналитические выражения, аппроксимирующие оптимальные по критерию минимума тока статора зависимости потокосцепления статора и угла между моментобразующими векторами от задания на момент двигателя, могут быть использованы при построении энергоэффективных систем управления тяговым электроприводом грузовых магистральных и маневровых тепловозов.

Оценка содержания диссертации, её завершенность

Диссертация Конохова Дмитрия Владимировича на соискание ученой степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой подробно исследована задача повышения энергоэффективности тяговых электроприводов с прямым управлением моментом асинхронных двигателей посредством оптимизации системы управления. Диссертационная работа изложена на 135-и страницах основного текста, состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 105 наименований.

Во введении отражена актуальность создания энергоэффективной системы прямого управления моментом тяговых электроприводов с асинхронными двигателями, степень разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, достоверность и апробация полученных результатов.

В первой главе проведен анализ существующих технических решений и направлений исследований в области создания энергоэффективного асинхронного электропривода, рассмотрены варианты реализации систем управления асинхронными электроприводами, особенности их построения, конкурентные преимущества и недостатки. Произведен и обоснован выбор наиболее предпочтительного варианта построения энергоэффективной системы управления, в качестве которой выбрана система прямого управления моментом, обладающая рядом весомых преимуществ относительно других применяемых топологий. Среди основных преимуществ автор выделяет следующие: система прямого управления моментом менее восприимчива к неточности информации об объекте управления и внешним возмущениям; обладает высоким быстродействием, исключает многократное преобразование координат, что обуславливает целесообразность её применения для тягового электропривода локомотивов. Со своей стороны

считаю целесообразным добавить, что впервые идею прямого управления моментом предложил М. Депенброк именно для тягового электропривода (M. Depenbrock Direct Self Control of the flux and rotary moment of a rotary-field machine), запатентовав один из актуальных и в настоящее время вариантов реализации системы прямого управления моментом (приоритет с 1984 г.).

Во второй главе предложен вариант оптимизации системы прямого управления моментом. Данный вариант основан на изменении задания потокосцепления статора по критерию минимума тока статора, что является вполне логичным и легко реализуемым в данной системе, так как в ней имеется отдельный канал задания потокосцепления статора. Соискателем разработана методика расчета оптимальной зависимости потокосцепления статора от задания на момент асинхронного тягового электродвигателя АД917УХЛ1, установленного на магистральных грузовых тепловозах 2ТЭ25А, выпускаемых Брянским машиностроительным заводом, и гибридном маневровом тепловозе ТЭМ9Н, выпущенном Людиновским тепловозостроительным заводом в рамках пилотного проекта. Следует отметить, что представленная методика расчета оптимальной зависимости применима не только для тяговых асинхронных двигателей, но и для общепромышленных. При расчете оптимальной зависимости автором был проведен анализ влияния нагрева обмоток статора и ротора электродвигателя. Результаты показали, что изменение температуры обмоток двигателя от -20°C до $+110^{\circ}\text{C}$ оказывает весьма незначительное влияние на значения оптимального потокосцепления статора и данными отклонениями можно пренебречь с целью упрощения алгоритмов системы управления. Расчет зависимости производился при номинальной частоте тока статора двигателя и варьировании задаваемых значений электромагнитного момента. Рассчитанные опорные точки были аппроксимированы полиномом 3-го порядка по методу наименьших квадратов.

В третьей главе предложенный автором энергоэффективный способ управления реализован в функциональной схеме СУ, разработан алгоритм управления асинхронным двигателем локомотива, позволяющий управлять потокосцеплением статора с целью минимизации тока статора. Разработаны алгоритмы функционирования блока логики переключений системы управления на энергосберегающий алгоритм формирования задания потокосцепления для тягового электропривода локомотивов, выполнено математическое моделирование электрической части тягового электропривода с реализацией энергоэффективного алгоритма в системе прямого управления моментом АД, подтверждена адекватность модели АД на основе сравнения результатов моделирования и справочных данных номинального режима двигателя.

Четвертую главу соискатель посвятил разработке комплексной электромеханической модели тягового электропривода и проверке предложенных принципов энергоэффективного регулирования асинхронных двигателей с системой прямого управления моментом на модели и лабораторной установке. Проведенные модельные эксперименты и эксперименты на лабораторной установке с преобразователем частоты ACS850, питающим асинхронный двигатель подтвердили правильность теоретических положений и целесообразность предложенных технических решений, направленных на повышение энергетической эффективности асинхронных электроприводов в целом и тяговых электроприводов, в частности.

В итоге можно констатировать, что диссертация имеет логичное построение и является полностью завершённой работой.

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Автореферат соответствует основному содержанию диссертационной работы.

Замечания и недостатки, выявленные в диссертации:

1. В первой главе, в обзоре работ по повышению энергоэффективности ошибочно указано, что в асинхронном двигателе необходимо учитывать изменение величины сопротивления обмоток статора с учетом эффекта вытеснения тока на низких частотах.

2. Во второй главе нет обоснования отсутствия в схеме замещения на рисунке 2.1 активного сопротивления цепи намагничивания.

3. Считаю излишним подробное описание оптимальной зависимости угла между моментобразующими векторами от момента АД, поскольку в дальнейшем данная зависимость не применяется в предложенной энергоэффективной системе прямого управления моментом АД.

4. Двигатели АД917УХЛ1 на магистральном грузовом тепловозе 2ТЭ25А имеют индивидуальное питание, - каждый от своего автономного инвертора; на тепловозе ТЭМ9Н двигатели двухосной тележки подключены параллельно к одному инвертору, - в работе не отражено, какие особенности параллельное подключение двигателей вносит в регулирование потокосцепления статора по оптимальной зависимости.

5. Приведенное в четвертой главе изображение комплексной компьютерной модели тягового электропривода локомотива из программного комплекса Matlab на рисунке 4.2 не позволяет оценить её структуру и не раскрывает сути её реализации.

Данные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки теоретических и практических результатов диссертационного исследования.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным в Положении о присуждении учёных степеней

Диссертация Конохова Дмитрия Владимировича на соискание учёной степени кандидата технических наук соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней».

– по пункту 10 диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, которые свидетельствуют о личном вкладе автора в науку. В диссертационной работе разработан способ энергетически эффективного управления асинхронным тяговым электродвигателем в системе прямого управления моментом. Предложенный соискателем энергоэффективный способ управления АД и методика расчета оптимальной зависимости потокосцепления статора от электромагнитного момента подтверждены результатами компьютерного моделирования и лабораторными испытаниями и могут быть использованы при проектировании систем управления асинхронными электроприводами. Предложенные автором диссертационной работы решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

– по пункту 11 основные положения и результаты, представленные в диссертации, опубликованы соискателем в 19-и научных работах, в том числе 4-х статьях, входящих в перечень ВАК.

– по пункту 14 в диссертации соискатель ученой степени надлежащим образом ссылается на авторов и источники заимствования материалов и отдельных результатов, также автором отмечены использованные результаты исследований, которые были им выполнены лично и в соавторстве.

Диссертация Конохова Дмитрия Владимировича на соискание учёной степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения, имеющие существенное значение для

повышения энергетической эффективности асинхронного тягового электропривода локомотивов, что соответствует п. 9 Положения о присуждении учёных степеней. Автор диссертационной работы, Конохов Дмитрий Владимирович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы».

Официальный оппонент,

Макаров Лев Николаевич,

доктор технических наук по специальности 05.09.01 –

Электромеханика и электрические аппараты;

генеральный конструктор ООО «Русэлпром»;

почтовый адрес: 109029, г. Москва, улица Нижегородская, 32, стр. 15;

телефон: 8 (495) 600-4254;

адрес электронной почты: makarov@ruselprom.ru.

«7» декабря 2018 г.



Макаров Л.Н.

Подпись Макарова Л.Н. удостоверяю.

Директор по административным
вопросам ООО «Русэлпром»
«07» декабря 2018 года



О.А. Бирюкова

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Конохова Дмитрия Владимировича

«Энергоэффективное прямое управление моментом асинхронных тяговых электродвигателей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Актуальность избранной темы

Разработка энергоэффективных систем управления тяговыми электроприводами (ТЭП) локомотивов с асинхронными двигателями является одним из приоритетных направлений развития железнодорожного транспорта. При этом варианты систем прямого управления моментом с повышенной энергетической эффективностью, превышающих по показателям скалярные и векторные системы и предпочтительных для асинхронных тяговых приводов, пока проработаны недостаточно. Реализация асинхронных тяговых электроприводов, обеспечивающих снижение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов, экономию ресурсов при эксплуатации, повышение надёжности и увеличение межремонтного интервала отмечена в Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года, что подтверждает актуальность выбранного направления диссертационных исследований.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационном исследовании, обоснованы результатами проведенного анализа имеющихся разработок в области энергосберегающих технологий для общепромышленных и тяговых асинхронных электроприводов. Также проанализированы различные топологии систем управления тяговыми

асинхронными электроприводами и произведен обоснованный и рациональный выбор быстродействующей и устойчивой к внешним возмущениям системы прямого управления моментом, имеющей отдельный канал задания и регулирования потокосцепления статора, позволяющий изменять потокосцепление по требуемому в конкретной системе привода энергосберегающему алгоритму.

Достоверность и новизна полученных результатов

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена грамотным обоснованием допущений, принятых в работе, корректным построением математических и компьютерных моделей, разработанных в среде Matlab/Simulink, а также проведенным лабораторным исследованием на модели тягового привода тепловоза с применением разработанных энергоэффективных алгоритмов оптимальных режимов асинхронного двигателя с прямым управлением моментом.

Научная новизна результатов диссертационного исследования, определяется следующими положениями:

- предложена методика определения зависимости потокосцепления статора от задания момента, оптимальной по критерию минимума тока статора, в системе прямого управления моментом;

- определены и аппроксимированы оптимальные зависимости потокосцепления от момента для асинхронного тягового электропривода тепловозов;

- разработан способ управления тяговым электроприводом локомотивов с асинхронными двигателями, реализующий энергетически эффективные режимы работы, посредством снижения потребления тока статора асинхронного тягового двигателя (АТД) от источника электроэнергии в системе прямого управления моментом;

- применительно к тяговому приводу локомотивов разработаны

алгоритмы функционирования блока логики задания потокосцепления статора, учитывающие особенности режимов работы локомотива.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

На основе теории электрических машин разработана и реализована графоаналитическая методика расчёта потокосцепления статора от задания момента асинхронного двигателя, оптимального по критерию минимума тока статора, получены аналитические выражения рассчитанной зависимости.

Разработанная математическая и компьютерная модель асинхронного тягового электропривода с энергоэффективной системой прямого управления моментом позволяет анализировать характеристики тягового электропривода локомотивов в режимах энергоэффективного регулирования с целью дальнейшей технической реализации данной системы.

Разработанный энергоэффективный алгоритм позволяет достичь снижения потребления тока статора и повысить коэффициент полезного действия тягового асинхронного электропривода.

Результаты работы приняты Людиновским тепловозостроительным заводом и используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».

Оценка содержания диссертации и её завершенности

Представленная к защите диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, а также трёх приложений. Основные положения диссертации изложены на 135 страницах машинописного текста.

Диссертация является завершенной научной работой. Все поставленные соискателем задачи решены в полной мере. Результаты выполненных расчетов и опытов, проведенных как на компьютерных

моделях, так и на лабораторной установке, представлены в виде графиков, таблиц и выводов по ним.

Во введении описана актуальность разработки энергоэффективных систем управления асинхронным тяговым электроприводом локомотивов, сформулированы поставленные цели и задачи исследования, отражена научная новизна, а также указаны теоретическая и практическая значимость, достоверность полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию различных вариантов реализации систем управления асинхронными электроприводами с возможностью повышения их энергоэффективности. Рассмотрены скалярные, частотно-токовые (как скалярный, так и векторный вариант реализации), классические векторные (полеориентированные) и системы прямого управления моментом. Автор обоснованно выделяет для тягового электропривода систему прямого управления моментом, которая имеет ряд весомых преимуществ, подробно описанных в диссертационной работе. Рассмотрены варианты оптимизации систем управления, из всех существующих решений автор выделяет вариант оптимизации системы управления по критерию минимума тока статора как наиболее эффективный.

Во второй главе соискателем сформирована и математически описана методика предварительной оценки оптимальных величин потокосцепления статора и угла между моментобразующими векторами в системе прямого управления моментом асинхронного тягового двигателя. Автор, опираясь на векторную диаграмму асинхронного двигателя в осях α - β , связанных со статором, и используя кусочно-линейную аппроксимацию кривой намагничивания АД, предварительно определяет диапазоны изменения оптимальных значений угла между моментобразующими векторами (током и потокосцеплением статора), а также величины потокосцеплений ротора и статора. Далее изложена разработанная автором методика графоаналитического расчета оптимальных по критерию минимума тока статора величин задания потокосцепления статора и угла между

моментаобразующими векторами от момента асинхронного двигателя. Методика предполагает учет насыщения магнитной цепи АДД по кривой намагничивания и влияние изменения величины активных сопротивлений обмоток статора и ротора при изменении температуры.

Третья глава посвящена разработке способа и созданию функциональной схемы, реализующей энергоэффективный алгоритм в системе прямого управления моментом асинхронного тягового электродвигателя, а также математическому описанию модели энергоэффективного прямого управления моментом АДД. Также реализована проверка адекватности разработанной модели асинхронного тягового двигателя АД917УХЛ1, которая подтвердила достоверность результатов моделирования. Асинхронный двигатель АД917УХЛ1 применяется на действующих магистральных грузовых тепловозах 2ТЭ25А, а также использован на гибридном маневровом тепловозе ТЭМ9Н.

В четвертой главе автором разработана комплексная компьютерная модель тягового электропривода локомотива с асинхронными двигателями. При разработке комплексной модели автор использовал современные программные комплексы «Универсальный механизм» и Matlab/Simulink. На основе полученных результатов проведен анализ эффективности предложенного энергосберегающего способа управления тяговым асинхронным электроприводом локомотивов на разработанной компьютерной модели. Результаты расчётов и моделирования подтвердили эффективность предложенного способа управления асинхронным тяговым электродвигателем в системе прямого управления моментом. Снижение потребления тока статора в режимах работы тягового электропривода с моментом нагрузки АДД ниже 50% от номинального достигается, в среднем, на 20-25 %. При этом возрастает коэффициент полезного действия АДД, в исследованных режимах повышение к.п.д. составляет от 2 до 12 %. Максимальный эффект достигается в режимах работы локомотива с минимальной нагрузкой (легковесный состав, лёгкий профиль пути).

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Достоинства диссертационной работы заключаются в следующем:

— диссертация написана научным и стилистически грамотным языком, структурирована на разделы и подразделы, не имеет сложных для восприятия формулировок;

— соискатель использовал современные средства математического моделирования и обработки результатов;

— каждая глава имеет краткие выводы по своему содержанию, что позволяет получить более ясное представление о проведенном исследовании и упрощает её восприятие;

— автор обосновал и подтвердил целесообразность теоретических изысканий по реализации энергоэффективного алгоритма управления асинхронным тяговым электроприводом на компьютерных моделях и лабораторной установке.

Диссертация при наличии достоинств имеет также ряд недостатков и замечаний:

— математическое описание методики предварительной оценки оптимального угла между моментобразующими векторами первоначально выполняется в системе координат связанной с полем ротора $d-q$, в то время как система прямого управления моментом построена в неподвижной системе координат $\alpha-\beta$, связанной со статором.

— оптимизация задания потокосцепления статора выполняется, преимущественно, для статических режимов работы ТЭП, хотя для ЭПС более присущи динамические режимы;

— во второй главе автор делает ряд ссылок на библиографический источник [4], что вполне обосновано. Однако на с. 42 ссылка по этому источнику на оптимальную зависимость потокосцепления ротора от момента по минимуму тока недостаточна, надо было привести сам график;

— подробное описание механизмов сопряжения механической и электрической подсистем комплексной модели тепловоза представляется излишней для изложения принципов функционирования энергоэффективной системы управления, разработанной в данном диссертационном исследовании.

Указанные замечания не снижают теоретической и практической значимости диссертационного исследования.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р

7.0.11-2011

Диссертация и автореферат соответствуют всем положениям, указанным в ГОСТ Р 7.0.11-2011. Системе стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления. М.: Стандартинформ. - 2012.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным в «Положении о присуждении учёных степеней» (пункты 9 – 14)

Диссертация соискателя Конохова Дмитрия Владимировича обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. В диссертации приводятся сведения о практическом использовании полученных автором научных результатов. Предложенные в диссертации технические решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.


Основные научные результаты диссертации Конохова Д.В. опубликованы в рецензируемых научных изданиях по направлению

исследования, указанных на официальном сайте ВАК в сети «Интернет», имеется четыре статьи по теме диссертации, опубликованных в журналах, рецензируемых ВАК.

В диссертации имеются ссылки на авторов и источники заимствованных материалов, а также на научные работы, выполненные Коноховым Д.В. лично и в соавторстве.

Диссертация Конохова Дмитрия Владимировича на соискание учёной степени кандидата технических наук является самостоятельной завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения по реализации энергоэффективной системы прямого управления моментом в асинхронном тяговом электроприводе локомотивов, имеющие существенное значение для развития железнодорожного транспорта, а её автор Д.В. Конохов заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Официальный оппонент,
Слепцов Михаил Александрович, кандидат технических наук,
05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы;
доцент, профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрического транспорта» ФГБОУ ВО Национального исследовательского университета «МЭИ»;
Почтовый адрес: Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14;
Телефон: +7 916 697 80 56; факс: +7 495 362 70 49
Электронная почта: SleptsovMA@mpei.ru.

 Слепцов М.А.
« 5 » декабря 2018 г.



Подпись удостоверяю
ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ

Л.И. ПОЛЕВАЯ