

На правах рукописи



Семыкина Ирина Юрьевна

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРНЫХ МАШИН
СРЕДСТВАМИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева»

Научный консультант –

доктор технических наук, доцент **Завьялов Валерий Михайлович**

Официальные оппоненты: **Усынин Юрий Семенович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок»
Иванчура Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», профессор кафедры систем автоматики, автоматизированного управления и проектирования
Пугачев Емельян Васильевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», заведующий кафедрой электромеханики

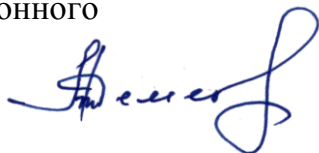
Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский государственный горный университет»

Защита состоится «24» сентября 2014 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова д.7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ул. Белинского, 55) и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.269.11
канд. техн. наук, доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Горные машины занимают одно из главных мест в технологическом процессе добычи полезных ископаемых. Эффективность их функционирования напрямую влияет на себестоимость добычи, а одним из средств повышения эффективности является внедрение регулируемых электроприводов, которые способны улучшить безотказность работы горных машин и повысить их КПД.

Следует отметить, что электроприводы ряда горных машин для открытых горных работ, электроприводы шахтных электровозов и некоторые другие строятся на базе регулируемых двигателей постоянного тока, однако большая часть электроприводов горных машин строится на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в силу их большей надежности, простоты обслуживания, меньших габаритов и других преимуществ. При этом доля регулируемого электропривода переменного тока для горных машин относительно невысока.

В настоящее время наблюдается интенсификация процесса внедрения частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в машины горнодобывающего производства. Данная тенденция берет начало еще со второй половины прошлого века, однако для ее закрепления и продвижения потребовались многочисленные работы как отечественных, так и зарубежных исследователей.

Большой вклад в решение задач исследования и построения систем управления для асинхронных электроприводов с частотным регулированием внесли М.М. Ботвинник, Б.М. Боченков, И.Я. Браславский, А.А. Булгаков, А.М. Вейнгер, А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, Н.Ф. Ильинский, А.Е. Козярук, М.П. Костенко, В.В. Панкратов, В.В. Рудаков, Ю.А. Сабинин, О.В. Слежановский, С.Г. Соколовский, В.М. Терехов, Ю.С. Усынин, Ю.П. Филлюшов, Ю.Г. Шакарян, Р.Т. Шрейнер, В.А. Шубенко, F. Blashke, B.K. Bose, M. Depenbrock, G. Dong, J. Holtz, I. Kioskeridis, D.S. Kirschen, H. Kubota, W. Leonard, T.A. Lipo, T. Noguchi, D.W. Novotny, I. Takahashi, C. Thanga Raj и др.

Частотно-регулируемый электропривод горных машин, помимо управления их движением, призван обеспечивать высокую надежность их функционирования. Важно отметить, что горные машины работают в условиях высоких динамических нагрузок, вызванных различными факторами, такими как резкопеременный характер нагрузки на исполнительном органе, действия оператора, наличие в механической подсистеме электроприводов упругих элементов и т.д. В процессе работы суммарное действие данных факторов вызывает механические напряжения, существенно превышающие средние значения, что снижает эксплуатационную надежность горных машин. В этих условиях использование возможностей систем управления электроприводов, обеспечивающих требуемый уровень и характер изменения механических напряжений в элементах трансмиссии, является эффективным способом снижения динамических нагрузок и, как следствие, повышения надежности.

Вопросами создания регулируемого электропривода для ограничения динамических нагрузок и в целом повышения надежности, производительности и безопасности функционирования горных машин занимались такие ученые как Г.И. Бабокин, В.Г. Базилевский, Б.В. Боровой, В.А. Бреннер, Ю.Я. Вуль,

П.Д. Гаврилов, А.В. Докукин, Е.К. Ещин, В.М. Завьялов, В.Д. Земляков, С.Л. Иванов, Н.Ф. Ильинский, В.Г. Каширских, В.И. Ключев, В.Ф. Кузнецов, А.И. Кухтенко, М.С. Ломакин, А.В. Ляхомский, Г.Б. Онищенко, Г.Г. Пивняк, Г.Я. Пятибратов, Б.Я. Стариков, В.С. Тулин, В.Н. Фащилenko и многие другие.

Несмотря на большой объем проведенных работ в области снижения динамических нагрузок в механической подсистеме электроприводов горных машин, остался ряд нерешенных вопросов, в частности одновременное достижение энергоэффективности и снижение динамических нагрузок, не ухудшая производительности.

В горных машинах с регулируемым электроприводом, зачастую, системы управления построены по принципу подчиненного регулирования координат, где основными регулируемыми переменными являются токи и угловая скорость двигателя. Такие системы управления в рабочем диапазоне нагрузок поддерживают угловую скорость вала двигателя на заданном уровне, а в случае перегрузок, ограничивают токи двигателя допустимым стопорным значением. Однако в этом случае ограничивается только величина электромагнитного момента двигателя, в то время как механические напряжения в элементах трансмиссии, в связи с наличием упругих звеньев, могут существенно превышать значения, соответствующие номинальному режиму работы, при этом сами двигатели работают в энергетически неоптимальных режимах.

Для исключения подобного необходимо внедрять в электроприводы системы управления, синтезированные с использованием нелинейных методов, в развитие которых значительный вклад внесли Б.Р. Андриевский, С.В. Емельянов, А.А. Красовский, В.Ф. Кротов, П.Д. Крутько, А.М. Ляпунов, И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, Л.С. Понтрягин, В.В. Солодовников, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович, С. Byrnes, S. Dubowsky, A. Isidori, Z. Jiang, Y.D. Landau, R. Marino, P. Tomei и др.

Тем не менее, несмотря на большое количество проведенных исследований, вопрос создания энерго- и ресурсоэффективных систем управления для электроприводов горных машин до сих пор до конца не решен.

Цель работы – разработка научно обоснованных решений для построения систем управления электроприводов горных машин, обеспечивающих повышение их эксплуатационного ресурса и снижение энергетических затрат.

Задачи исследований

1. Разработать алгоритм управления электродвигателем, удовлетворяющий требованиям использования его в качестве основы для энерго- и ресурсосберегающего электропривода.

2. Проанализировать характеристики разработанного алгоритма управления электродвигателем с точки зрения условий эксплуатации электроприводов горных машин.

3. Составить математическое описание процессов, протекающих в электроприводе горной машины, позволяющее производить количественную оценку энергоэффективности его работы.

4. Разработать методики минимизации мощности потерь электропривода на базе разработанных алгоритмов управления электродвигателем.

5. Провести сравнительную оценку энергоэффективности электроприводов горных машин в зависимости от структуры системы управления электродвигателем.

6. Разработать систему ресурсосберегающего управления электроприводами горных машин с учетом вопросов энергосбережения.

7. Исследовать работу элементов предложенной системы энерго- и ресурсоэффективного управления на примере действующих электроприводов горной машины в условиях горнодобывающих предприятий.

Научная новизна работы заключается в следующем

1. Разработан обобщенный алгоритм градиентного управления, который можно адаптировать для управления электрическими двигателями любого типа, а также модификации алгоритма градиентного управления с учетом особенностей эксплуатации электроприводов горных машин.

2. Получена оригинальная математическая модель для определения мощности потерь в стали двигателя переменного тока, выраженная через переменные состояния двигателя и мгновенные значения управляющих воздействий.

3. Предложена система энергооптимального градиентного управления электроприводом переменного тока с оптимизацией на этапе синтеза структуры, обеспечивающая снижение мощности электрических потерь и мощности потерь в стали посредством выбора весовых коэффициентов.

4. Получены новые аналитические зависимости амплитуд векторов потоков сцепления статора и ротора двигателя от заданной величины электромагнитного момента, обеспечивающие минимизацию мощности электрических потерь и мощности потерь в стали.

5. Разработана система ресурсосберегающего управления электроприводами горных машин и предложены оригинальные регуляторы скорости движения исполнительного органа, обеспечивающие минимизацию переменной составляющей моментов упругих сил в передачах.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в определении и исследовании характеристик градиентного управления электродвигателем с точки зрения достижимости целей управления и оценки влияния различных факторов на ошибку регулирования; в выявлении и анализе зависимостей между мощностью потерь электроприводов горных машин и динамическим состоянием их электродвигателей; в предложенной методике отыскания минимума суммарной мощности электрических потерь и потерь в стали по результатам вычислительных экспериментов проведенных с использованием расширенной математической модели электропривода учитывающей, коммутационный характер и наличие ограничений на величину подводимого к двигателю напряжения, а также нелинейность кривой намагничивания двигателя; в разработке регуляторов для системы управления электроприводов горных машин с целью повышения их энергоэффективности и снижения в них динамических нагрузок.

Методы исследований. В процессе выполнения работы использовались математические методы синтеза систем управления (скоростного градиента, аналитического конструирования агрегированных регуляторов); теория обобщенной электрической машины; методы численного решения систем дифферен-

циальных уравнений; компьютерное моделирование динамических процессов в разработанной системе регулируемого электропривода; методы планирования эксперимента и обработки результатов при лабораторных и промышленных испытаниях разработанных устройств.

Реализация алгоритмов управления электроприводов производилась путем моделирования в среде Delphi, а также экспериментально на базе цифрового сигнального процессора с использованием языка программирования C/C+.

Положения, выносимые на защиту

1. Градиентное управление обеспечивает достижение требуемого состояния для электроприводов, построенных на базе всех наиболее распространенных в промышленности, в том числе горнодобывающей, типов двигателей.

2. Градиентное управление обеспечивает работоспособность электроприводов горных машин с учетом особенностей их эксплуатации, в частности, наличием ограничений на величину питающего напряжения и использованием многодвигательного электропривода.

3. Градиентное управление электроприводом может использоваться как основа для энергооптимальной системы управления электроприводом горной машины, как при оптимизации на этапе синтеза структуры, так и при оптимизации на этапе формирования задания.

4. Аналитические зависимости мощности электрических потерь и мощности потерь в стали от амплитуд векторов потокосцепления статора и ротора двигателя могут использоваться в качестве основы для формирования энергооптимальной системы управления электроприводом горной машины, построенной на базе любых векторных способов управления электродвигателем.

5. Энергооптимальная система управления электроприводом, с оптимизацией на этапе формирования задания, построенная на базе градиентного управления и прямого управления моментом, может рассматриваться как безынерционный источник момента относительно механической подсистемы электроприводов горных машин.

6. С применением адаптивных и интеллектуальных методов может быть синтезирован такой регулятор скорости движения исполнительного органа, который позволяет не снижая суммарной производительности горной машины обеспечить снижение переменной составляющей моментов упругих сил в механических подсистемах электроприводов горных машин, повышая их эксплуатационный ресурс.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением математических методов и моделей, адекватность которых реальным процессам подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований; удовлетворительной сходимостью результатов, полученных теоретически и экспериментально при проведении лабораторных и промышленных испытаний; применением современного оборудования; согласованностью результатов компьютерного моделирования исследуемых процессов с экспериментальными данными.

Положительные результаты, полученные при проведении лабораторных и промышленных испытаний, подтверждают применимость предложенных мето-

дов и технических решений, а также справедливость научных положений и выводов.

Реализация выводов и рекомендаций работы

Опытный образец преобразователя частоты с градиентным управлением электромагнитным моментом асинхронного двигателя прошел успешные испытания в условиях ООО «Электромашина» (г. Кемерово) и принят к использованию для внедрения в опытную серию.

Система управления с использованием безынерционного источника момента воплощена в совместной разработке кафедры «Электропривод и автоматизация» КузГТУ и ООО «Электромашина» – частотном преобразователе лебедки конвейера, который успешно эксплуатируется на шахтах Кемеровской области.

Методика отыскания по результатам вычислительных экспериментов оптимального магнитного потока, обеспечивающего минимизацию суммарных электрических и магнитных потерь, принята для внедрения в ОАО «СУЭК-Кузбасс» (г. Ленинск-Кузнецкий).

Научные результаты, полученные в работе, также используются в учебном процессе студентов КузГТУ направления подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки «Электропривод и автоматика» (квалификация – бакалавр) в дисциплинах «Теория электропривода», «Системы управления электроприводов», «Адаптивные и интеллектуальные системы управления в электроприводе» и «Автоматизированный электропривод».

Апробация работы

Основное содержание работы, ее отдельные положения и результаты докладывались и получили одобрение на следующих конференциях:

Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2005, 2007, 2009, 2011 гг.); Всероссийская научно-практическая конференция «Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях» (г. Новокузнецк, 2006, 2008, 2010, 2012 гг.); Международная научно-практическая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» (г. Кемерово 2006, 2008, 2010, 2012 гг.); XX Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20» (г. Ярославль, 2007 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса» (г. Кемерово, 2007 г.); Научно-техническая конференция с международным участием «Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2007» (г. Новосибирск, 2007 г.); Международная научно-практическая конференция «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (г. Новокузнецк, 2007 г.); Международная научно-практическая конференция «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (г. Кемерово, 2007, 2009, 2011 гг.); V China-Russia symposium on underground and building engineering of city and mine «Advances in geotechnical and structural engineering» (Qingdao, China 2008); Международная научно-практическая конференция Сагиновские чтения № 5 «Наука и образование – ведущий фактор Стратегии «Казахстан–2050» (Караганда, Казахстан 2013 г.); ежегодные научно-технические конференции профессорско-преподавательского состава КузГТУ (г. Кемерово, 2005-2013 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 50 печатных работ, в состав которых входят 3 патента на изобретение и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. При этом 14 работ опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК для докторских диссертаций.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, приложений и содержит 312 страниц текста, 87 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 294 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность результатов исследований.

В первой главе выполнен обзор существующих проблем энерго- и ресурсосбережения при эксплуатации горных машин и показано, что эффективным способом решения этих проблем является использование регулируемого электропривода.

Работа электроприводов (ЭП) горных машин, в основном, протекает в интенсивном повторно-кратковременном режиме, с большой частотой включений, широким диапазоном изменения нагрузки. Эксплуатация ведется в тяжелых условиях, сопровождается ударами, вибрацией, запыленностью. Распределение нагрузки на отдельные элементы трансмиссии ЭП в цикле работы горной машины (ГМ) носит случайный характер и зависит от действий оператора, крепости породы, характеристик забоя и т.д. При этом существенную долю общей нагрузки составляют динамические нагрузки, вызванные наличием упругих элементов трансмиссии, ускоренным движением исполнительного органа и др.

Все эти факторы негативным образом отражаются на долговечности функционирования не только ЭП, но и ГМ в целом и приводят к поломкам. При этом доля затрат на ремонт горнодобывающего оборудования по оценкам специалистов составляет до 40 % от себестоимости добычи угля.

Анализ показал, что среди известных способов повышения эксплуатационного ресурса ГМ на практике недоиспользованным является организационный способ, который предусматривает управление движением исполнительного органа ГМ, за счет регулируемого ЭП, обеспечивающего снижение статических и динамических нагрузок. В свою очередь, для снижения динамических нагрузок наилучшим решением является управление электродвигателем с целью регулирования усилий в элементах механических передач и исполнительных органах ГМ, в основу которого ложится формирование электромагнитного момента двигателя в соответствии с заданием, получаемым от специального регулятора.

Исходя из этого, электропривод ГМ, в котором основным используемым типом электрических машин являются асинхронные двигатели (АД), должен строиться с применением преобразователей частоты (ПЧ). В то же время изготовление таких ЭП во взрывозащищенном рудничном исполнении сопряжено с рядом сложностей, в силу которых до сих пор в существенной доле ГМ используются нерегулируемые асинхронные ЭП, работающие в режиме прямого пуска,

для которых характерны знакопеременные моменты на валу двигателя, значительно снижающие ресурс механической передачи, а также высокие энергетические затраты.

Практикой на примере ЭП общепромышленного назначения доказано, что внедрение ПЧ помимо решения технологических задач является эффективной мерой энергосбережения. В то же время вопросу создания ЭП для ГМ, обеспечивающих их энергетическую эффективность, до сих пор не

уделяется должного внимания, несмотря на то, что затраты на электроэнергию по оценкам специалистов могут достигать до 20 % от себестоимости добычи угля, а двигатели ЭП ГМ имеют мощность от десятков киловатт до единиц мегаватт, т.е. обладают существенным потенциалом для энергосбережения.

Схематично существующие принципы энергосбережения, применяемые в ЭП, представлены на рис. 1. Как показал анализ, большая их часть в той или иной степени встречается на практике при создании ЭП ГМ, однако вопросы энергосбережения зачастую решаются попутно и не выделяются в отдельную задачу. При этом, учитывая необходимость обеспечивать ресурсосбережение посредством интенсивного регулирования электромагнитного момента двигателя, в ЭП ГМ наибольшим энергосберегающим эффектом обладает оптимизация электропривода по потерям, вопрос которой для ГМ в настоящее время не проработан.

Обзор энергооптимальных систем частотно-регулируемого ЭП показал, что для их организации в рамках ГМ с точки зрения системы управления (СУ) электродвигателем следует отказаться от скалярных СУ АД в пользу векторных, а среди последних следует отдавать предпочтение тем, которые не имеют в своем составе поисковых регуляторов, поскольку они предполагают инерционность управления, и для ГМ в условиях резкопеременных нагрузок не дадут ожидаемого эффекта.

На основе проведенного обзора существующих решений энерго- и ресурсосбережения в области электроприводов ГМ определена цель работы и сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе предложены системы управления электродвигателем ЭП ГМ, являющиеся основой для одновременного решения и задач энергосбережения и задач ресурсосбережения.



Рис. 1. Специфика подходов к энергосбережению в электроприводах ГМ

Основным требованием к таким СУ с точки зрения ресурсосбережения является возможность с высокой точностью и быстродействием управлять электромагнитным моментом двигателя. Однако, при формировании требуемого электромагнитного момента возможна работа электродвигателя в энергетически неоптимальных режимах, что недопустимо с точки зрения обеспечения энергоэффективности. Таким образом, неотъемлемой частью задачи управления электродвигателем ЭП ГМ, является управление его внутренним состоянием.

Для ЭП переменного тока одновременная реализация указанных целей управления возможна с применением систем полеориентированного управления, прямого управления моментом, а также с использованием методов управления, построенных на базе нелинейной теории автоматического управления, позволяющих синтезировать регуляторы исходя из индивидуальных динамических особенностей объекта управления.

В качестве такого метода управления для ЭП ГМ предложено градиентное управление (ГУ), обеспечивающее движение к цели управления с максимальной интенсивностью за счет формирования такого управляющего воздействия $\mathbf{u}=[u_{1u} \ u_{1v} \ u_{2u} \ u_{2v}]^T$, содержащего составляющие векторов напряжения, подводимого к статору $\mathbf{u}_1$ и ротору $\mathbf{u}_2$ двигателя, которое изменяется пропорционально градиенту скорости изменения целевой функции $Q(\mathbf{x},t)$.

Алгоритм изменения управляющего воздействия в виде уравнения:

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\Gamma \frac{\partial \omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} = -\Gamma \left[\frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} \right]^T \frac{\partial Q(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}},$$

где Γ – симметричная положительно определенная матрица усиления; $\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ – скорость изменения целевой функции в силу уравнений объекта управления $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$; $\mathbf{x}$ – вектор переменных состояния объекта управления; t – время, фактически определяет, в каком направлении должен изменяться вектор $\mathbf{u}$, а реализовать его заданное направление можно с использованием регуляторов различного типа, например, интегрального (И), пропорционального (П), их комбинации или знакового (З).

Рассматривая в качестве объекта управления обобщенную электрическую машину (ОЭМ), математически описанную через потокосцепления двигателя в произвольно вращающейся системе координат u - v , и задавшись целью управления в виде формирования требуемого значения электромагнитного момента M^* и требуемых значений амплитуды векторов потокосцепления статора $(\psi_1^2)^*$ и ротора $(\psi_2^2)^*$ в квадратичной форме, градиент $\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ по $\mathbf{u}$ примет вид:

$$\frac{\partial \omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -h_1 \psi_{2v} \Delta_M + h_2 \psi_{1u} \Delta_{\psi 1} \\ h_1 \psi_{2u} \Delta_M + h_2 \psi_{1v} \Delta_{\psi 1} \\ h_1 \psi_{1v} \Delta_M + h_3 \psi_{2u} \Delta_{\psi 2} \\ -h_1 \psi_{1u} \Delta_M + h_3 \psi_{2v} \Delta_{\psi 2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где h_1, h_2, h_3 – диагональные элементы матрицы весовых коэффициентов $\mathbf{H}$; $\psi_{1u}, \psi_{1v}, \psi_{2u}, \psi_{2v}$ – составляющие векторов потокосцепления статора ψ_1 и ротора ψ_2 , $\Delta_M, \Delta_{\psi 1}, \Delta_{\psi 2}$ – ошибки между текущими и желаемыми значениями M , амплитуды вектора ψ_1 и амплитуды вектора ψ_2 .

Уравнение (1) является базой для составления алгоритма ГУ, задавая направление для изменения вектора управляющих воздействий $\mathbf{u}$. При этом полученный алгоритм может легко быть адаптирован для управления электрическими двигателями различного типа, применив приемы, справедливые для перехода от обобщенной электрической машины к математическому описанию конкретных типов двигателей. А учитывая, что при его синтезе использовалась математическая модель в произвольно вращающейся системе координат, любой алгоритм ГУ, построенный на базе (1), инвариантен относительно выбранной системы координат и может использоваться без специальных координатных преобразований.

Для полученного обобщенного алгоритма градиентного управления проведена аналитическая оценка достижимости целей управления. В ходе нее установлено существование и единственность решений системы управление – объект управления. Подтверждена ограниченность модуля вектора $\mathbf{x} = [\psi_{1u} \ \psi_{1v} \ \psi_{2u} \ \psi_{2v} \ \omega]^T$, где ω – угловая скорость двигателя, при условии ограниченности целевой функции, т.е. решения $\mathbf{x}(t)$ системы управление – объект управления в пределе не бесконечны. Также подтверждено, что градиент $\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ будет иметь убывающий характер, а значит при изменении $\mathbf{u}$ в направлении, обратном данному градиенту, будет реализовано наиболее интенсивное движение объекта управления в направлении желаемого состояния. Однако доказано, что цель управления может быть достигнута не при любых начальных условиях.

Последнее утверждение проверяется неравенством:

$$\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, t) \leq -\rho \left(\frac{1}{2} h_1 (\Delta_M)^2 + \frac{1}{2} h_2 (\Delta_{\Psi_1})^2 + \frac{1}{2} h_3 (\Delta_{\Psi_2})^2 \right), \quad (2)$$

где $\rho(Q(\mathbf{x}, t))$ – произвольная скалярная непрерывная строго возрастающая функция, для которой $\rho(0)=0$; $\mathbf{u}^* = [u_{1u}^* \ u_{1v}^* \ u_{2u}^* \ u_{2v}^*]^T$ – постоянный вектор управляющих воздействий, раскрыв которое подстановкой $\mathbf{u}^*$ в $\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ установлено, что все компоненты вектора $\mathbf{u}^*$ связаны произведением с компонентами вектора $\mathbf{x}$, т.е. не существует постоянного значения $\mathbf{u}$, при котором цель управления достигается, а, следовательно, для достижения цели управления необходимо ограничить возможные состояния объекта управления определенными ненулевыми начальными условиями.

Данное обстоятельство не исключает принципиальную возможность достижимости целей управления, а (2) может использоваться для отыскания начальных условий в частных случаях ГУ конкретными типами двигателей.

Одной из особенностей предложенного градиентного управления является наличие в нем коэффициентов усиления Γ , влияющих на динамику, а также весовых коэффициентов $\mathbf{H}$, определяющих точность движения объекта управления в направлении желаемого состояния. Значения матрицы Γ должны определяться физическими пределами реализуемости вектора $\mathbf{u}$, а матрицы $\mathbf{H}$ зависеть от требуемой точности. При этом оценка влияния различных факторов на точность ГУ показала, что в идеальных условиях в системе с И регулятором статическая ошибка равна нулю, а при использовании П регулятора или З регулятора невозможно добиться нулевых ошибок по управлению.

Указанная оценка производилась подстановкой уравнения алгоритма управления в модель объекта управления с последующим поочередным выделением Δ_{Ψ_1} , Δ_{Ψ_2} и Δ_M :

$$\begin{aligned}\Delta_{\Psi_1} &= \frac{1}{\gamma h_2} \left(\sigma R_1 \left(L_{12} \frac{\psi_2^2}{\psi_1 \psi_2 \cos(\angle \psi_1, \psi_2)} - L_2 \right) + \omega_{\psi} \tan(\angle \psi_1, \psi_2) \right); \\ \Delta_{\Psi_2} &= \frac{1}{\gamma h_3} \left(\sigma R_2 \left(L_{12} \frac{\psi_1^2}{\psi_1 \psi_2 \cos(\angle \psi_1, \psi_2)} - L_1 \right) - (\omega_{\psi} - p\omega) \tan(\angle \psi_1, \psi_2) \right); \\ \Delta_M &= \frac{1}{2 \cdot \gamma h_1} \left(\frac{(\omega_{\psi} - p\omega) \psi_2^2 - \omega_{\psi} \psi_1^2}{\psi_1 \psi_2 \cos(\angle \psi_1, \psi_2)} - \sigma L_{12} (R_1 + R_2) \tan(\angle \psi_1, \psi_2) \right),\end{aligned}$$

где $\Gamma = \gamma$; ω_{ψ} – угловая скорость вектора ψ ; R_1 , R_2 – активные сопротивления статора и ротора соответственно; L_1 , L_2 – индуктивности обмоток статора и ротора; L_{12} – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; $\sigma = 1/(L_1 L_2 - L_{12}^2)$ – коэффициент рассеяния; p – число пар полюсов. Таким образом, существует взаимосвязанность всех ошибок между собой, при этом, чем выше значение соответствующего весового коэффициента, тем ниже в результате получится ошибка управления.

Поскольку ошибки Δ_{Ψ_1} , Δ_{Ψ_2} и Δ_M отражают разницу между заданными величинами и состоянием двигателя, замещением последнего формируется система уравнений в матричной форме:

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} (\Delta_{\Psi_1})^2 \\ (\Delta_{\Psi_2})^2 \\ (\Delta_M)^2 \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \Delta_{\Psi_1} \\ \Delta_{\Psi_2} \\ \Delta_M \end{bmatrix} + \mathbf{C} \begin{bmatrix} \Delta_{\Psi_1} \Delta_{\Psi_2} \\ \Delta_M \Delta_{\Psi_1} \\ \Delta_M \Delta_{\Psi_2} \end{bmatrix} = \mathbf{D},$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$ и $\mathbf{D}$ – матрицы коэффициентов, зависящие от параметров объекта управления, величин заданных воздействий, а также внешних возмущений, к которым отнесены ω и ω_{ψ} . Решение данной системы геометрически представляет собой пересечение трех криволинейных поверхностей второго порядка в пространстве ошибок и может быть получено численно для конкретной рабочей точки с целью последующей оптимизации системы управления – объект управления по критерию минимизации ошибки регулирования, где варьируемыми параметрами являются настроечные коэффициенты матрицы $\mathbf{H}$.

Одной из наиболее важных особенностей функционирования ЭП ГМ является ограниченность питающих их источников энергии. С точки зрения градиентного управления это означает, что не каждое управление $\mathbf{u}$, рассчитанное по (1) может быть реализовано, а все его составляющие должны быть ограничены как сверху, так и снизу максимальным значением напряжения $U_{\max}$.

Чтобы это учесть, предложена модификация алгоритма градиентного управления, в которую дополнительной компонентой объекта управления входит нелинейность, накладываемая ограничением $\mathbf{u}$, описанная гладкой непрерывно дифференцируемой по неограниченному управляющему воздействию $\mathbf{v}$ функцией $v(\mathbf{v})$, в качестве которой рекомендован для использования арктангенс.

Таким образом, определено заданное направление изменения $\mathbf{v}$, которое опирается на (1), и совместно с П регулятором формирует алгоритм градиентного управления в виде уравнения:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 - \Gamma \frac{\partial \omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{v}} = \mathbf{v}_0 - \mathbf{f}(\mathbf{x}) \frac{1}{1 + \left(\frac{\pi}{2} \frac{\mathbf{v}}{U_{max}} \right)^2}, \quad (3)$$

где $\mathbf{v}_0$ – начальные условия для неограниченного управляющего воздействия; $\Gamma = \text{diag}[\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4]$; $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \Gamma \cdot \partial \omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) / \partial \mathbf{u}$, которое необходимо разрешить относительно $\mathbf{v}$. В ходе его решения определен диапазон возможных значений $\mathbf{v}_0$, при которых (3) будет физически реализуемо:

$$\text{abs}(\mathbf{v}_0) < \frac{2}{\pi} U_{max} \sqrt{6 \left(\sqrt{3} \cos \left(\frac{5}{18} \pi \right) - 1 \right)} \approx 0,525 U_{max}.$$

Для анализа работоспособности ГУ и проверки полученных выводов, выполнены вычислительные эксперименты методом компьютерного моделирования, где объектом выступала ОЭМ с параметрами, соответствующими двигателю мощностью 200 кВт. Эксперименты проводились при номинальной нагрузке и ступенчатым приложением задающих воздействий.

В первой серии экспериментов управляющее воздействие, подаваемое на двигатель, формировалось при помощи ГУ по (1) совместно с И, П и ПИ регуляторами без учета ограничений, а в качестве заданий использовались номинальные значения электромагнитного момента M_n и амплитуд векторов потокосцепления статора ψ_{1n} и ротора ψ_{2n} . Для примера на рис. 2 показаны результаты вычислительных экспериментов при использовании ПИ регулятора.

Поскольку для всех исследуемых вариантов в результате вычислительных экспериментов наблюдались автоколебания как M , так и ψ_1 и ψ_2 , количественная оценка ошибки регулирования в установившемся режиме производилась по средневзвешенному показателю, который в дальнейшем для упрощения изложения назван средневзвешенной ошибкой δ .

Анализируя полученные результаты установлено, что наибольшей точностью обладает ГУ с И регулятором, где δ_M составляет 0,007 %, а δ_ψ – 0,018 %, т.е. пренебрежимо

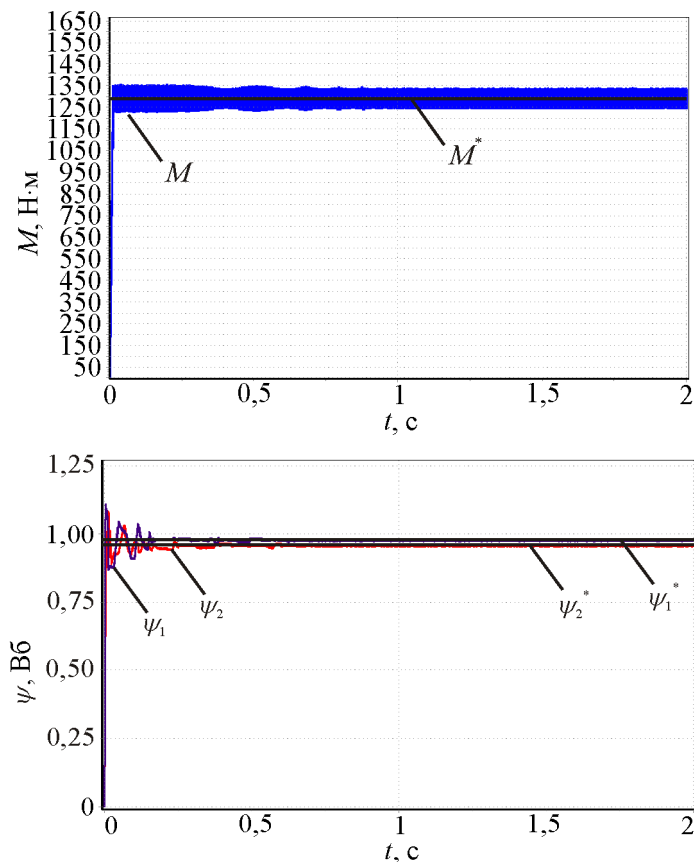


Рис. 2. ГУ с ПИ регулятором

малы, а наименьшей – с П регулятором, где $\delta_M = 2,89 \%$, а $\delta_\Psi = 8,69 \%$. При этом снижение точности в случае П регулятора сопровождается снижением динамической ошибки, которая имеет существенное значение для вопросов как энерго- так и ресурсосбережения. Исходя из этого рекомендуется использовать ГУ с ПИ регулятором, обладающее близкой к П регулятору малой динамической ошибкой (6,76 % по моменту, 11,43 % и 12,59 % по потокосцеплениям статора и ротора), и высокой точностью регулирования $\delta_M = 0,2 \%$ и $\delta_\Psi = 0,35 \%$.

Указанные результаты получены без учета ограничений, в связи с чем, вторая серия экспериментов проводилась для модификации ГУ по (3). Анализируя работу в условиях, аналогичных первой серии, установлено, что наличие ограничений негативно сказывается на точности регулирования, так что $\delta_M = 0,94 \%$ и $\delta_\Psi = 1,14 \%$. Это объясняется нелинейными искажениями u_1 относительно v_1 возникающими при необходимости расходовать подводимое напряжение не только на создание токов, но и на преодоление ЭДС вращения двигателя, возрастающей с ростом скорости. По этой же причине при возрастании ω относительно ω_n более чем на 25 %, нелинейность подводимого к двигателю напряжения уже не может удерживать M на уровне M^* и двигатель теряет управляемость, переходя в режим, подобный неуправляемой работе с пониженной частотой и номинальной амплитудой подводимого напряжения.

Отдельно рассматривалось ГУ с 3 регулятором, для которого вопрос ограничения напряжения решается естественным образом. Для него в силу тех же физических причин, при повышении ω двигатель теряет управляемость, однако это происходит при превышениях ω_n более чем на 94 %, что свидетельствует о большей устойчивости этого алгоритма. Обеспечиваемая им точность так же высока, так δ_M составляет 0,05 %, а δ_Ψ – 0,12 %. Это подтверждает высокие характеристики ГУ с 3 регулятором по совокупности показателей и позволяет ему достойно конкурировать с вариантом ПИ регулятора.

Описанные результаты получены для однодвигательного ЭП. В то же время в условиях непрерывного наращивания мощностей ГМ, с целью снижения их габаритов такие ЭП зачастую делают многодвигательными, с учетом чего задача построения ГУ приобретает особые аспекты, связанные с необходимостью обеспечивать согласование значений M , развиваемого каждым из двигателей, с учетом возможного расхождения в их параметрах.

Для оценки влияния данной особенности ЭП ГМ проведены дополнительные вычислительные эксперименты на двухдвигательном ЭП, где в качестве приводных двигателей использованы взрывозащищенные АД марки ДКВ355L4, работающие на один вал и управляемые при помощи одного ПЧ, а в качестве обратных связей в (1) использовались переменные только одного двигателя, принятого эталонным, а параметры второго, принятого испытуемым, варьировались в пределах $\pm 20 \%$.

Полученные результаты свидетельствуют, что изменение параметров одного из двигателей многодвигательного электропривода не приводит к искажениям переходных процессов в эталонном двигателе, но вызывает статические и динамические ошибки по M испытуемого двигателя и, как следствие, суммарного момента электропривода M_Σ . Например, при увеличении R_2 на 10 % средне-

взвешенная ошибка по M_Σ составила 4,36 %, а динамическая ошибка 7,23 %, что проиллюстрировано на рис. 3, а.

Исходя из этого, разработана модификация алгоритма ГУ для многодвигательного ЭП, обеспечивающая управление значением M_Σ за счет регулирования u_1 , выраженного в неподвижной системе координат α - β :

$$\begin{aligned} u_{1\alpha} &= -\frac{U_{max}}{2n \cdot T_m} \int \left(\sum_{i=1}^n \left(-\frac{M_i - M_i^*}{M_{ni}} \psi_{1\beta i} + \frac{(\psi_{1i})^2 - (\psi_{1i}^*)^2}{\psi_{1ni}^2} \psi_{1\alpha i} \right) \right) dt; \\ u_{1\beta} &= -\frac{U_{max}}{2n \cdot T_m} \int \left(\sum_{i=1}^n \left(\frac{M_i - M_i^*}{M_{ni}} \psi_{1\alpha i} + \frac{(\psi_{1i})^2 - (\psi_{1i}^*)^2}{\psi_{1ni}^2} \psi_{1\beta i} \right) \right) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где i – индекс, показывающий отношение переменной или параметра к i -му двигателю из n ; T_m – период модуляции ПЧ.

Для построения (4) внесены изменения в объект управления, путем включения в него математической модели одновременно нескольких АД, работающих на один вал, а также принят ряд упрощений. В частности, проведена замена составляющих ψ_2 на соответствующие составляющие ψ_1 , ошибки регулирования момента и потокосцепления выражены в относительных единицах, а элементы матрицы усиления выбраны из условия, чтобы задание напряжения статора не выходило за область ограничений.

Оценка влияния индивидуальных и групповых отклонений параметров в пределах диапазона ± 20 % на качество регулирования M_Σ подтвердила, что, несмотря на наличие ошибок регулирования M_i , средневзвешенные ошибки регулирования M_Σ не выходят за пределы 3 %. Для примера, на рис. 3, б показаны результаты моделирования работы двухдвигательного ЭП, управляемого по (4) при совокупном увеличении R_1 и R_2 испытуемого двигателя на 10 %, где дина-

мическая ошибка регулирования M_i лежит в пределах $\pm 6,5$ %, средневзвешенная ошибка – в пределах ± 5 %, в то время как ошибки регулирования M_Σ пренебрежимо малы.

Таким образом, ГУ в различных модификациях обеспечивает высокое качество регулирования не только однодвигательного, но и многодвигательного ЭП с учетом основных особенностей эксплуатации ГМ.

В третьей главе описаны варианты создания систем энергооптимального управления ЭП ГМ на базе ГУ. Поскольку для решения этой задачи необходимо иметь количественную оценку мощности, расходуемой на потери, составлено математическое описание различных составляющих потерь электропривода.

Данное математическое описание включает в себя потери в пассивных элементах, таких как фильтры управляющих

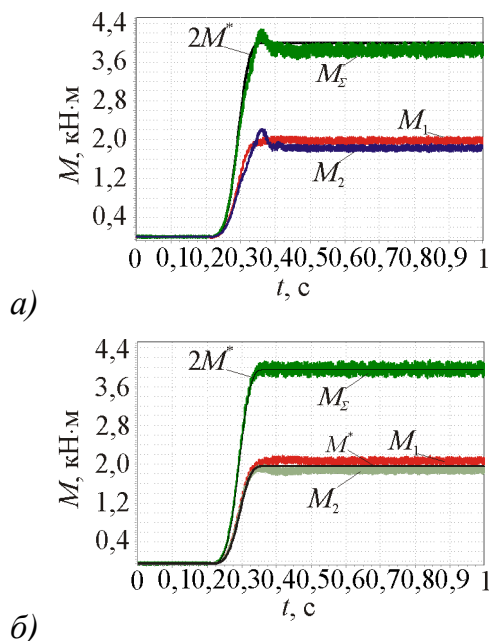


Рис. 3. ГУ двухдвигательным ЭП при увеличении на 10 %: а) R_2 для (1); б) R_1 и R_2 для (4)

преобразователей и силовые кабельные линии, потери в полупроводниковых коммутационных устройствах, детализированные для диодов, тиристоров и IGBT-транзисторов, а также потери в двигателе. Из последних выделены магнитные потери (потери в стали), электрические потери (потери в меди), механические потери и добавочные потери, при этом особое внимание уделено потерям в стали.

В отличие от типовых рекомендаций, используемых при расчетах мощности потерь в стали ΔP_c , принято решение отказаться от формул, зависящих от угловой скорости двигателя ω , поскольку данный подход справедлив при длительной работе ЭП в установившемся режиме, однако в условиях работы ГМ, характеризующихся повышенной динамичностью переходных процессов, учитывая также, что для управления их ЭП применяются полупроводниковые управляющие преобразователи, данный подход не позволит в полной мере учесть величину магнитных потерь при решении задачи энергосбережения.

Предложенный подход основан на связи между частотой перемагничивания магнитопровода и состоянием двигателя. Для ее установления разделены потери в стали, возникающие в статоре и в роторе, мощностью ΔP_{c1} и ΔP_{c2} соответственно. Для ΔP_{c2} с учетом однозначной взаимосвязи индукции магнитного поля с амплитудой вектора потокоцепления ψ_2 справедливо:

$$\Delta P_{c2} = k_{c2} (\omega_\psi - p\omega)^\beta \psi_2^2,$$

где β – показатель степени, зависящий от марки стали, как правило, лежащий в пределах между 1 и 2; k_{c2} – коэффициент потерь в стали ротора, учитывающий коэффициент обработки, удельные потери в стали, массу магнитопровода, площадь сечения магнитопровода и число витков обмотки ротора.

Выразив $(\omega_\psi - p\omega)$ из математического описания двигателя в полеориентированной системе координат $d-q$ и преобразовав результат для неподвижной системы координат, получено уравнение, описывающее мощность потерь в стали ротора:

$$\Delta P_{c2} = k_{c2} \left((u_{2\beta} \psi_{2\alpha} - u_{2\alpha} \psi_{2\beta}) + \sigma R_2 L_{12} (\psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}) \right)^\beta (\psi_2)^{2(1-\beta)}. \quad (5)$$

Аналогично (5), из общего уравнения:

$$\Delta P_{c1} = k_{c1} (\omega_\psi)^\beta \psi_1^2,$$

где k_{c1} – коэффициент потерь в стали статора, идентичный по смыслу k_{c2} , получено уравнение мощности потерь в стали статора:

$$\Delta P_{c1} = k_{c1} \left((u_{1\beta} \psi_{1\alpha} - u_{1\alpha} \psi_{1\beta}) + \sigma R_1 L_{12} (\psi_{2\beta} \psi_{1\alpha} - \psi_{2\alpha} \psi_{1\beta}) \right)^\beta (\psi_1)^{2(1-\beta)}. \quad (6)$$

Анализируя (5) и (6) с учетом описания электромагнитного момента:

$$M = \sigma L_{12} p (\psi_{1\beta} \psi_{2\alpha} - \psi_{1\alpha} \psi_{2\beta}),$$

подтверждено существование в динамических режимах зависимости между нагрузкой двигателя и ΔP_c , но по мере приближения текущего состояния двигателя к заданным значениям M^* , ψ_1^* или ψ_2^* , влияние M компенсируется за счет относительного расположения векторов ψ_1 и ψ_2 , а также $\mathbf{u}_1$ и $\mathbf{u}_2$, формирующих установившуюся частоту вращения поля статора и ротора двигателя относительно магнитопровода. Другим важным выводом из анализа (5) и (6) является подтверждение зависимости ΔP_c от составляющих $\mathbf{u}_1$ и $\mathbf{u}_2$, величина которых, а так-

же интенсивность их изменения в существенной мере определяются особенностями СУ конкретного ЭП.

Для анализа применимости (5) и (6) выполнены вычислительные эксперименты, где в качестве объекта моделирования выступала ОЭМ с параметрами, соответствующими двигателю мощностью 200 кВт с учетом насыщения магнитопровода двигателя аппроксимацией кривой намагничивания полиномом четвертого порядка. В качестве СУ выбрано ГУ по (1). Эксперименты проводились как для идеализированного управляющего преобразователя, так и с учетом коммутации силовых полупроводниковых ключей и ограничения подводимого к двигателю напряжения.

В ходе экспериментов методом моделирования определялась ΔP_c как сумма величин по (5) и (6), а также ΔP_s в соответствии с выражением:

$$\Delta P_s = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2,$$

где i_1, i_2 – амплитуды векторов тока статора и ротора соответственно.

Результаты приведены на рис. 4, где показано изменение ΔP_c для одного и того же заданного состояния двигателя при идентичных настройках ПИ регулятора, используемого в ГУ, в случае идеализированного управляющего преобразователя и с учетом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения двигателя.

На рис. 4 все переменные, полученные в ходе моделирования с учетом ШИМ, содержат высокочастотную составляющую, отсутствующую при идеализированном преобразователе. При этом среднее расхождение результатов моделирования с учетом и без учета ШИМ, за исключением ΔP_c , не превышает 2 %. Среднее расхождение результатов моделирования по величине ΔP_c составляет 830 % относительно моделирования без ШИМ, что, пренебрегая механическими и добавочными потерями, соответствует снижению КПД двигателя с 96,6 % до 90,3 %, и свидетельствует об адекватности в целом математической модели вычисления потерь в стали по (5) и (6), а также обосновывает ее включение наряду с другими компонентами в общее математическое описание потерь ЭП.

Таким образом, в составленном математическом описании выделены потери, зависящие от составляющих векторов токов статора и ротора i_1 и i_2 , потери,

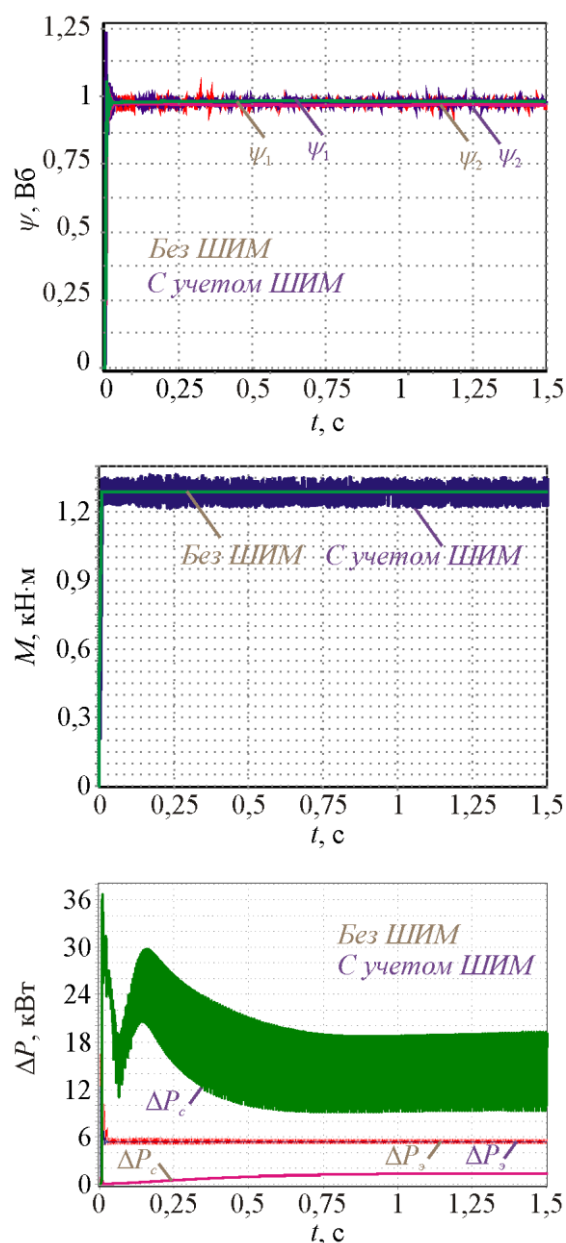


Рис. 4. Проверка адекватности модели потерь в стали

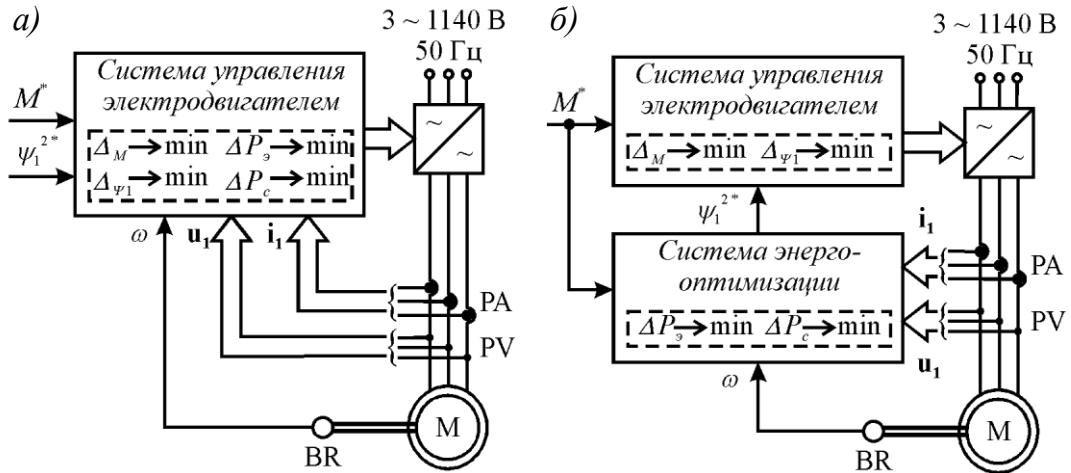


Рис. 5. Подходы к организации энергооптимального ГУ: а) при синтезе структуры СУ; б) при формировании задания для СУ

зависящие от ψ_1 , ψ_2 и от u_1 , u_2 , а также зависящие от ω . Т.е. определена часть потерь ЭП, формируемая внутренним состоянием двигателя, которая может быть минимизирована средствами его системы управления, а также часть потерь ЭП, формируемая текущим состоянием механической подсистемы, которая рассматривается как реакция на внешние условия и при обеспечении идентичного движения механической подсистемы ЭП также будет идентичной. Исходя из этого, сформулированы два основных критерия, минимизация которых обеспечит энергосбережение посредством управления электродвигателем:

$$\Delta P_s = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 \rightarrow \min ; \quad (7)$$

$$\Delta P_c = \Delta P_{c1} + \Delta P_{c2} \rightarrow \min . \quad (8)$$

На базе ГУ оптимизация по данным критериям возможна двумя путями, схематично показанными на рис. 5 – на этапе составления целевой функции при синтезе системы управления, и путем создания внешней структуры по отношению к системе управления электродвигателем.

Для реализации энергооптимального ГУ на этапе синтеза системы управления в целевую функцию $Q(\mathbf{x}, t)$ помимо требуемых значений M^* , $(\psi_1^2)^*$ и $(\psi_2^2)^*$ включены требуемые значения ΔP_s^* и ΔP_c^* , которые в пределе равны нулю. Исходя из этого, в качестве основы для алгоритма энергооптимального ГУ получен градиент $\omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ по $\mathbf{u}$:

$$\frac{\partial \omega(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)}{\partial \mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -h_1 \psi_{2\beta} \Delta M + h_2 \psi_{1\alpha} \Delta P_1 + h_4 \Delta P_s \partial \Delta P_s / \partial \psi_{1\alpha} + h_5 \Delta P_c \partial \Delta P_c / \partial \psi_{1\alpha} \\ h_1 \psi_{2\alpha} \Delta M + h_2 \psi_{1\beta} \Delta P_1 + h_4 \Delta P_s \partial \Delta P_s / \partial \psi_{1\beta} + h_5 \Delta P_c \partial \Delta P_c / \partial \psi_{1\beta} \\ h_1 \psi_{1\beta} \Delta M + h_3 \psi_{2\alpha} \Delta P_2 + h_4 \Delta P_s \partial \Delta P_s / \partial \psi_{2\alpha} + h_5 \Delta P_c \partial \Delta P_c / \partial \psi_{2\alpha} \\ -h_1 \psi_{1\alpha} \Delta M + h_3 \psi_{2\beta} \Delta P_2 + h_4 \Delta P_s \partial \Delta P_s / \partial \psi_{2\beta} + h_5 \Delta P_c \partial \Delta P_c / \partial \psi_{2\beta} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 – диагональные элементы матрицы $\mathbf{H}$.

Полученное уравнение (9) структурно сложнее (1), вследствие чего требует большего вычислительного ресурса, а также обладает очевидной избыточностью, что приводит к неполной управляемости системы управления – объект управления, выражающейся в снижении точности регулирования при усилении (7) или (8) посредством весовых коэффициентов.

Для подтверждения данного вывода рассмотрен вариант реализации такого энергооптимального ГУ применительно к АД с короткозамкнутым ротором, причем с целью упрощения последующего анализа критерий (8) исключен из рассмотрения обнулением коэффициента h_5 , а критерий (7) редуцирован за счет исключения составляющих ΔP_3 , возникающих вследствие протекания токов по роторной цепи, с введением взамен h_4 сборного коэффициента h_3' .

Оценка работы данной модификации алгоритма ГУ выполнена посредством вычислительных экспериментов, где объектом для моделирования выбран АД с параметрами двигателя марки 4A80A4SY3, а влияние управляющего преобразователя не учитывалось. Моделирование проводилось при ступенчатом приложении задающих воздействий, величиной M_n и ψ_{1n} . Для имитации характерной ГМ резкопеременной нагрузки, величина M_c формировалась в виде несинусоидального периодического сигнала со средним значением M_n и разбросом в пределах $\pm 40\%$.

Результаты моделирования, показанные на рис. 6, где для наглядности приведена работа, как с оптимизацией, так и без оптимизации при выборе h_3' равным нулю, свидетельствуют, что введение критерия оптимизации снижает ток статора на 4,5 % в результате чего происходит снижение ΔP_3 , однако одновременно увеличивает δ_m с 0,05 % до 0,64 % и δ_ψ до 21 %, что хоть и обеспечивает попутно существенное снижение ΔP_c , но является недопустимым с точки зрения качества регулирования. Таким образом, указанный подход рекомендуется только в условиях равенства или превышения числа управляющих воздействий над числом целей управления или при создании ЭП общепромышленного назначения, для которых не критичны требования к точности регулирования состояния двигателя.

Таким образом применительно к ЭП ГМ для создания энергооптимального ГУ рекомендуется использовать оптимизацию на этапе формирования задания, которая формулируется как отыскание таких векторов ψ_1 и ψ_2 в зависимости от M^* , при которых суммарная мощность ΔP_3 и ΔP_c будет минимальна.

Ввиду многокритериальности задачи, ее решение выполнено поэтапно. На первом

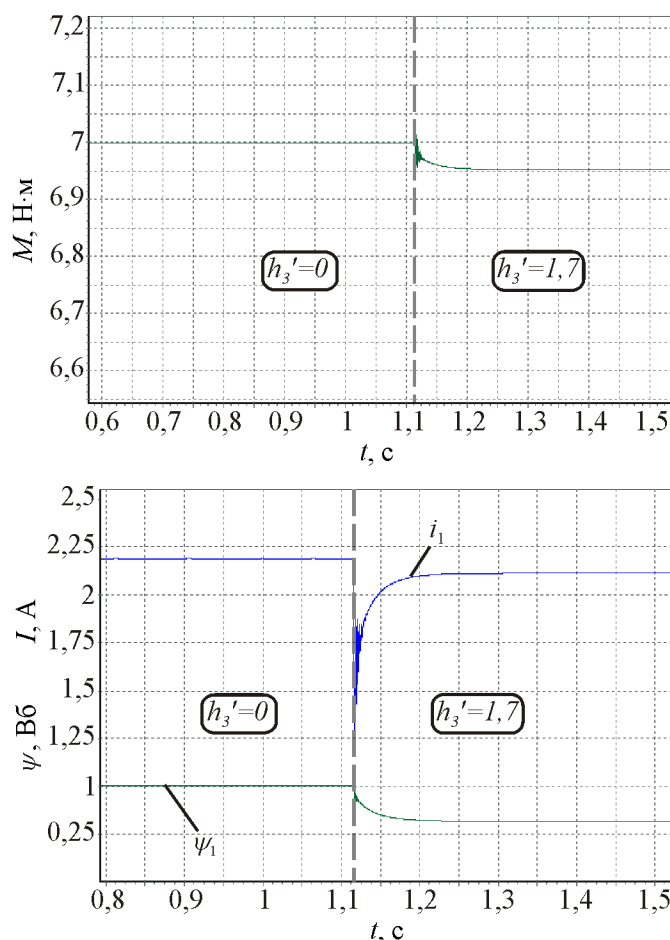


Рис. 6. Работа энергооптимального ГУ с оптимизацией на этапе синтеза

этапе минимизирована величина ΔP_{Σ} , предполагая, что заданные величины ψ_1^* и M^* известны. Для этого ΔP_{Σ} и M выражены через составляющие ψ_1 и i_1 в системе координат $d-q$, полеориентированной по потокосцеплению статора и объединены в общее выражение, представляющее собой квадратичную зависимость $\Delta P_{\Sigma}(i_{1d})$, являющуюся однозначно положительной, не имеющей вещественных корней и имеющей строгий минимум. Опираясь на координаты данного минимума и уравнения электромагнитной связи, определена оптимальная заданная амплитуда вектора потокосцепления ротора:

$$\psi_2^{onm} = \sqrt{\left(\psi_1^*\right)^2 \left(\frac{L_2}{L_{12}} - \frac{2R_2 L_1}{L_{12} \sigma (L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2)} \right)^2 + \left(\frac{M^*}{p \psi_1^* L_{12} \sigma} \right)^2}, \quad (10)$$

реализация которой обеспечит минимизацию ΔP_{Σ} для конкретного режима работы, а также получена их количественная оценка в этом режиме:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma}^{onm} = & \left(\left(\psi_1^* \frac{R_2 L_1}{L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2} \right)^2 + \left(\frac{M^*}{p \psi_1^*} \right)^2 \right) R_1 + \\ & + \left(\left(\frac{\psi_1^* - L_1 (\psi_1^* R_2 L_1 / (L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2))}{L_{12}} \right)^2 + \left(-\frac{L_1}{L_{12}} \frac{M^*}{p \psi_1^*} \right)^2 \right) R_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Исследование полученных зависимостей проведено методом компьютерного моделирования, где в качестве объекта управления использовалась ОЭМ с параметрами, соответствующими двигателю мощностью 200 кВт, а в качестве СУ использовалось ГУ по (1) с ПИ регулятором. Вычислительными экспериментами подтверждено, что при задании ψ_2^* , отличном от (10) для конкретного режима работы, установившееся значение ΔP_{Σ} возрастает по квадратичной зависимости. Установлено, что эффективность (10) при $\psi_1^* \leq \psi_{1n}$ не снижается, даже при моделировании с учетом насыщения магнитопровода двигателя, а увеличение ΔP_{Σ} относительно (11) при моделировании с учетом насыщения происходит лишь при ψ_1^* , превышающем ψ_{1n} в полтора раза. Также установлено, что характер зависимостей ΔP_{Σ}^{onm} и ψ_2^{onm} от ψ_1^* меняется при различных значениях M^* , данные зависимости носят экстремальный характер (рис. 7), а координаты экстремума при изменении как ψ_1^* так и M^* смещаются.

Опираясь на этот анализ, реализован второй этап задачи энергетической оптимизации в ходе которого, вычислив ψ_1^* при котором $d\Delta P_{\Sigma}^{onm}/d\psi_1^*$ обращается в ноль, определена оптимальная заданная амплитуда вектора потокосцепления статора:

$$\psi_1^{onm-\Sigma} = \sqrt[4]{\frac{\left((M^* / p)^2 \left(R_1 + (-L_1 / L_{12})^2 R_2 \right) (L_{12}^2 R_1 + L_1^2 R_2)^2 \right)}{\left(R_1 (R_2 L_1)^2 + R_2 (R_1 L_{12})^2 \right)}}, \quad (12)$$

реализация которой совместно с (10) в качестве заданного значения для СУ обеспечит минимизацию ΔP_{Σ} для конкретного M^* .

Поскольку координаты экстремумов семейств зависимостей, показанных на рис. 7,а и рис. 7,б не совпадают, т.е. в конкретном режиме работы минимуму ΔP_{Σ} не соответствует минимум ΔP_c , третьим этапом проведена минимизация ΔP_c . При этом, учитывая выводы из анализа (5) и (6) об индивидуальных осо-

бенностях формирования напряжения в зависимости от СУ, подход к минимизации ΔP_c на базе данного математического описания отвергнут, как неразрешимый аналитически, а для решения задачи использовано математическое описание ΔP_c для режима, когда текущее состояние двигателя приближено к заданному:

$$\Delta P_c = k_{c1} (\omega_\psi)^\beta \psi_1^2 + k_{c2} (\omega_\psi - p\omega)^\beta \psi_2^2,$$

где ω и ω_ψ рассматриваются как внешние возмущения, согласно которому ΔP_c минимизируется при минимальной величине ψ_1^2 и ψ_2^2 .

С учетом найденного решения задачи минимизации ΔP_c , координаты минимума ΔP_c определены по координатам экстремумов зависимостей ψ_2^{opt} от ψ_1^* и M^* , показанных на рис. 7,б.

Таким образом, получена оптимальная заданная амплитуда вектора потокосцепления статора:

$$\psi_1^{opt-M} = \sqrt{\frac{M^*}{p(L_2\sigma - 2R_2L_1 / (L_{12}^2R_1 + L_1^2R_2))}}, \quad (13)$$

реализация которой в качестве заданного значения для СУ обеспечит минимизацию ΔP_c для конкретного M^* .

Анализ эффективности оптимизирующих выражений (10), (12) и (13) проведен посредством вычислительных экспериментов методом компьютерного моделирования, где в качестве объекта выступала ОЭМ с параметрами, соответствующими двигателю мощностью 200 кВт как без учета насыщения магнитопровода, так и с аппроксимацией кривой намагничивания двигателя полиномом четвертого порядка. Эксперименты выполнены при варьировании M_c и ω и ступенчатом приложении задающих воздействий. В качестве СУ использовалось ГУ по (1). Эксперименты проводились как для идеализированного управляющего преобразователя, так и при учете коммутации силовых полупроводниковых ключей и ограничении максимального значения подводимого напряжения.

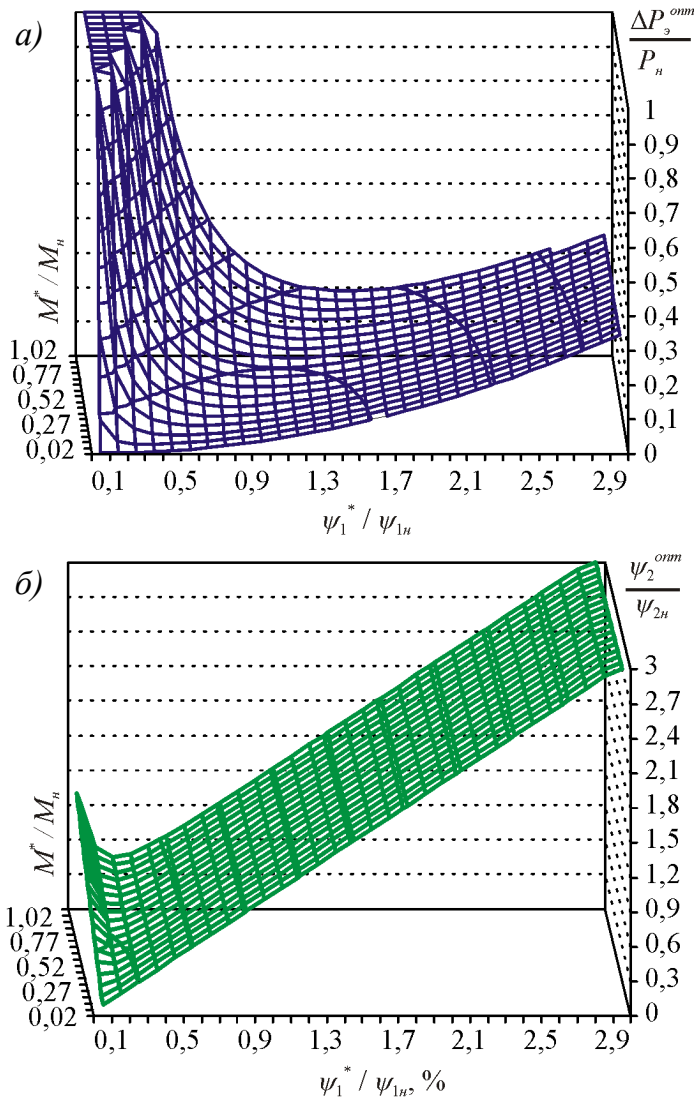


Рис. 7. Семейства зависимостей от ψ_1^* и M^* : а) ΔP_c^{opt} ; б) ψ_2^{opt}

В первой серии экспериментов исследовано влияние M^* при различных установившихся ω на величину ΔP_ω и ΔP_c при идеализированном управляющем преобразователе для совместного использования (10), (12), т.е. оптимизации по электрическим потерям, и (10), (13), т.е. оптимизации по потерям в стали. Результаты моделирования для случая, когда ω равна ω_n , представлены на рис. 8, где обозначено: 1) ΔP_c без учета насыщения; 2) ΔP_c с учетом насыщения; 3) ΔP_ω без учета насыщения; 4) ΔP_ω с учетом насыщения. Они свидетельствуют, что в случае оптимизации по (10) и (12) значение ΔP_ω невелико, однако ΔP_c завышено, причем с учетом насыщения как ΔP_ω и ΔP_c с ростом M^* существенно возрастают, т.е. задание ψ_1^* больше ψ_{1n} недопустимо. А при оптимизации по (10) и (13) существенно завышено ΔP_ω при приемлемом уровне ΔP_c . Недопустимость оптимизации только по одной из составляющей общих потерь двигателя подтверждает корректность используемой модели.

Исходя из изложенного, поставлена задача отыскания промежуточного состояния двигателя, для которого ψ_1^* находится между значениями $\psi_{1\text{опт-м}}$ и $\psi_{1\text{опт-э}}$ и обеспечивает минимизацию $\Delta P_\omega + \Delta P_c$. С учетом особенностей математического описания (5) и (6) в динамических режимах, а также учитывая, что уровень ΔP_c будет варьироваться в зависимости от выбранной СУ, предложена методика численного отыскания $\psi_{1\text{опт-с}}$, обеспечивающего минимизацию $\Delta P_\omega + \Delta P_c$, состоящая из следующих этапов:

1. Разбиение с учетом особенностей эксплуатации ЭП диапазона изменения ω и диапазона изменения M_c на интервалы, число которых не должно быть менее четырех.
2. Определение ряда ψ_1^* в интервале от $\psi_{1\text{опт-м}}$ до $\psi_{1\text{опт-э}}$ или до ψ_{1n} , если $\psi_{1\text{опт-э}}$ превышает это значение, с шагом, величина которого не должна превышать 20 % от ψ_{1n} и рекомендуется равной 5 % от ψ_{1n} .

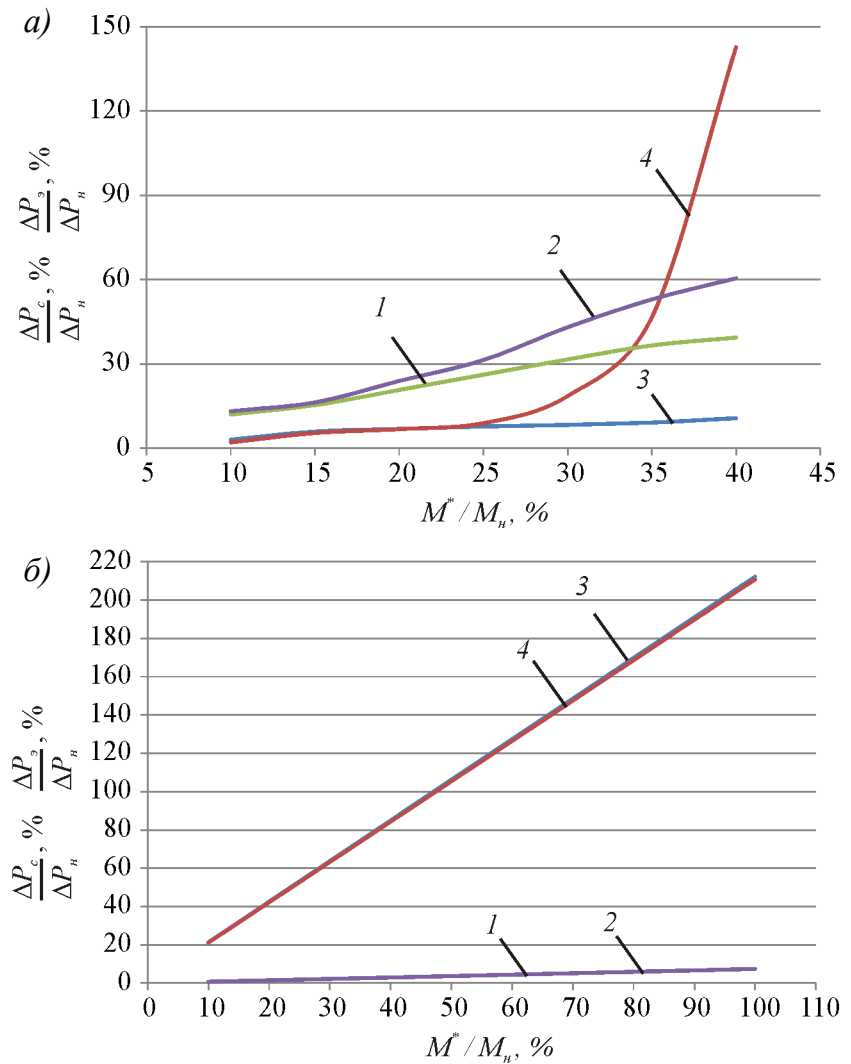


Рис. 8. Результаты оптимизации:
а) по (10) и (12); б) по (10) и (13)

3. Проведение для каждой узловой точки полученных интервалов серии вычислительных экспериментов, длительность которых должна превышать время переходного процесса по ω не менее чем вдвое.

4. Фильтрация полученных $\Delta P_c + \Delta P_\omega$, отсекая составляющие с частотой превышающей собственную частоту двигателя, определяемую его электрической постоянной времени.

5. Определение ψ_1^{om-c} методом прямого перебора полученного множества $\Delta P_c + \Delta P_\omega$, как ψ_1^* , соответствующая их минимуму.

На примере ГУ с 3 регулятором показан результат применения данной методики, где для конкретной ω зависимость ψ_1^{om-c} от M^* носит s-образный характер с интенсивным переходом уровней и в пределах диапазона работы, в котором не сказывается ограничение подводимого напряжения, практически не зависит от ω .

Достоинством предложенной методики определения ψ_1^{om-c} является ее применимость не только для ГУ, но и для других СУ двигателями переменного тока, предусматривающими возможность регулирования состояния двигателя, например, для векторного управления (ВУ) и прямого управления моментом (ПУМ).

Для оценки энергетических характеристик ВУ и ПУМ в сравнении с ГУ, а также для оценки их применимости для создания СУ электроприводов ГМ с точки зрения динамических характеристик, проведены дополнительные вычислительные эксперименты, где в качестве объекта для моделирования выбран взрывозащищенный АД марки ДКВ355LB4.

Сравнение энергетических характеристик проведено по результатам пуска АД из состояния покоя в рабочую точку ω_n , M_n при идентичных настройках регулятора скорости двигателя, а в качестве эталонной меры использовались результаты прямого пуска (ПП). В ходе экспериментов определена полезная энергия на валу двигателя $W_{пол}$ и суммарная энергия ΔW электрических потерь и потеря в стали в абсолютном выражении и относительно потребляемой двигателем энергии $W_{ном}$, которые рассчитаны за фиксированный промежуток времени 5 с при различных значениях длительности перехода в номинальную рабочую точку T_n .

В ходе анализа полученных результатов (табл. 1) установлено, что при $T_n < 1$ с, наилучшие показатели демонстрирует ГУ с ПИ регулятором, а при $T_n > 1,5$ с – ВУ. Как ПУМ, так и ГУ с 3 регулятором имеют более высокий уровень потерь, что объясняется более широким спектром гармонических составляющих в токах двигателя, но при $T_n < 0,5$ с они занимают промежуточное положение между ВУ и ГУ с ПИ регулятором, одновременно обеспечивая передачу от двигателя в механическую подсистему ЭП большей мощности в единицу времени за счет более высокой точности регулирования.

С учетом этого, для тех же вычислительных экспериментов выполнена оценка статической и динамической точности регулирования M , которая показала, что во всех СУ динамическая ошибка ϵ_m не зависит от T_n и для ПУМ и ГУ находится в пределах 20 %, а для ВУ – 35 %, средневзвешенная ошибка δ_ψ для ГУ с 3 регулятором и ПУМ не превышает 0,07 %, для ГУ с ПИ регулятором – 0,1 %, а для ВУ – 0,3 %.

Таблица 1
Энергетические характеристики различных СУ

T_n, c	$W, кВт \cdot c / \Delta W, кВт \cdot c / \Delta W, \%$				
	ПП	ВУ	ПУМ	ГУ ПИ	ГУ 3
0,1	1379,8	1378,54	1475,86	1469,2	1471,21
	4				
	732,98	139,05	97,94	74,38	93,42
0,6	34,52	9,06	6,13	4,77	5,53
		1320,44	1398,1	1391,74	1393,43
		80,92	80,59	66,65	86,03
1,1		5,71	5,36	4,52	5,35
		1252,44	1320,33	1314,26	1315,68
		66,17	76,99	65,19	84,73
1,6		4,96	5,42	4,67	5,53
		1180,95	1242,59	1236,67	1237,91
		59,53	74,5	64,04	84,04
2,1		4,74	5,56	4,87	5,77
		1108,06	1164,9	1159,14	1160,15
		55,34	72,32	62,95	83,41
2,6		4,7	5,74	5,09	6,05
		1034,19	1087,1	1081,72	1082,38
		52,29	70,54	61,89	82,76
		4,75	5,98	5,34	6,35

Для оценки возможности использования каждой рассмотренной СУ в составе энергооптимального ЭП ГМ с учетом интенсивного изменения M , проведены дополнительные вычислительные эксперименты, предусматривающие изменение формы заданного потокосцепления. Их суть заключалась в стабилизации M при условии, что ψ_1^* или ψ_2^* изменяется по линейной и синусоидальной зависимости с различной интенсивностью, а также в согласованном изменении M и ψ_1^* или ψ_2^* . Результаты моделирования для опыта линейного нарастания приведены на рис. 9, которые показывают, что для ВУ при низких темпах нарастания ψ_2^* характерно резкое изменение уровня M в

силу особенностей работы источника тока в условиях ограничений, накладываемых питающей сетью на подводимое к двигателю напряжение, для ГУ как с ПИ, так и с 3 регулятором при заниженном ψ_1^* режим ограничения напряжения не сказывается, однако проявляется инерционность формирования M при задании менее 15 % от $\psi_{1н}$, что легко ликвидируется введением дополнительной зависимости между ψ_1^* и весовыми коэффициентами ГУ, а для ПУМ не проявляются ни инерционность формирования M , ни нелинейные искажения, вызванные ограничениями напряжения.

По итогам сравнительного анализа результатов моделирования по всем проведенным вычислительным экспериментам установлено, что из рассматриваемых СУ наилучшими динамическими характеристиками обладает ПУМ и ГУ с ПИ регулятором, которые обеспечивают возможность согласованного изменения M^* и ψ_1^* с частотой выше 1 Гц, а наилучшим сочетанием динамических и энергетических характеристик – ГУ с ПИ регулятором, которое рекомендуется как основа для энергооптимальных электроприводов ГМ.

В четвертой главе с использованием полученных выше систем энергооптимального управления электродвигателем разработана система ресурсосберегающего управления ЭП ГМ. Сформулированы требования к такой СУ, которая должна:

1. Ограничивать упругие силы и моменты в механической подсистеме электропривода, а также величины электромагнитных моментов их двигателей, максимально допустимыми значениями.

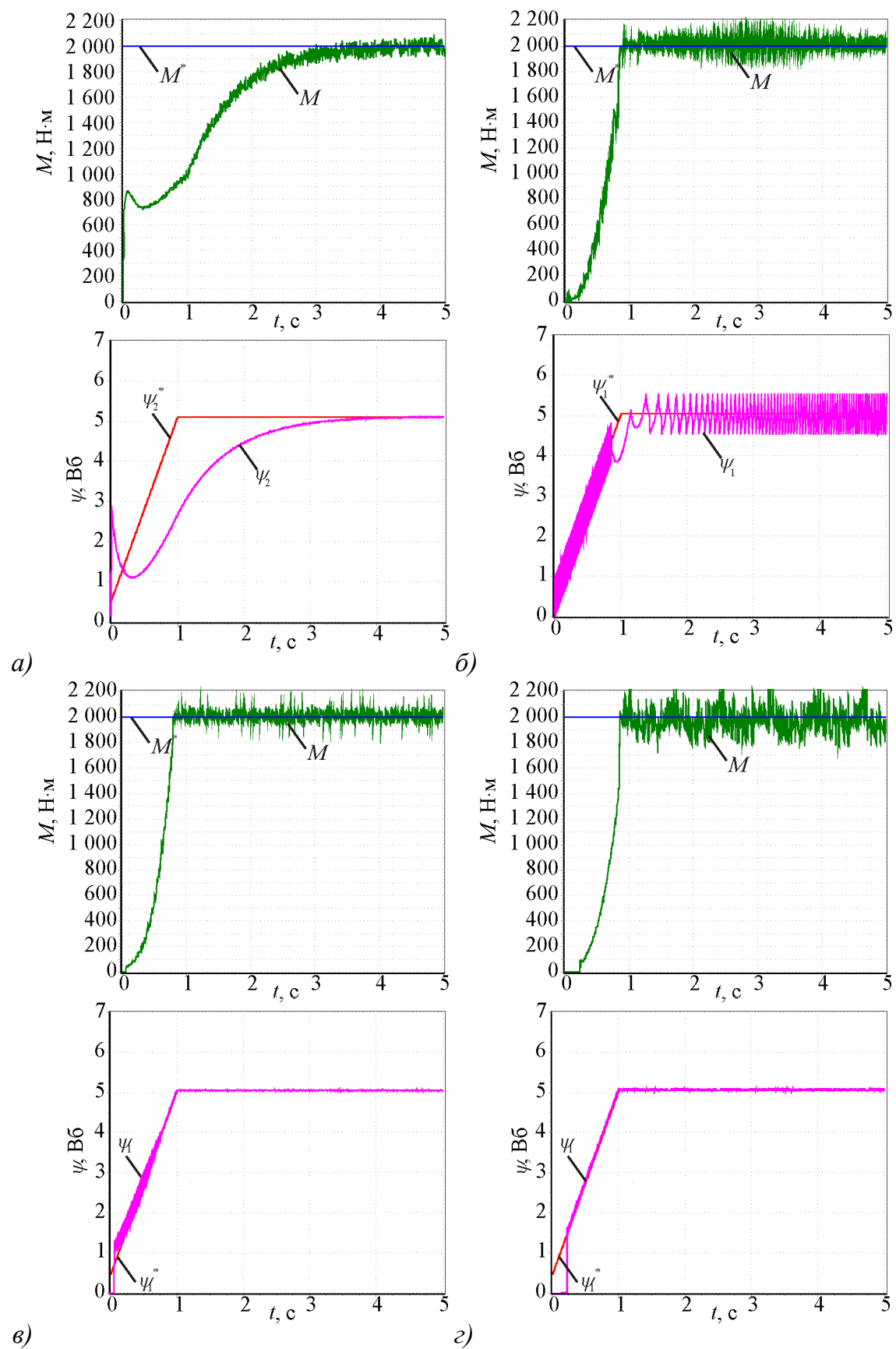


Рис. 9. Линейное нарастание потокосцепления при стабилизации момента:
 а) ВУ; б) ПУМ; в) ГУ с ПИ регулятором; г) ГУ с 3 регулятором

2. Обеспечивать изменение упругих сил и моментов по заданной траектории без дополнительных динамических колебаний.

3. Поддерживать скорость движения исполнительного органа в пределах некоторого заданного диапазона в окрестностях желаемой траектории, внутри которого возможно ее произвольное изменение в зависимости от нагрузки.

Показано, что исходя из предъявленных выше требований, система ресурсосберегающего управления ЭП ГМ должна обеспечивать качественное управление одновременно несколькими переменными при нелинейном и, как правило, громоздком математическом описании ЭП ГМ. Для упрощения процедуры синтеза, данную систему предложено разделить на части, выделив систему энергооптимального управления электродвигателем как безынерционный источник момента, отрабатывающий M^* , формируемый СУ механической частью ЭП. Здесь под безынерционным источником момента (БИМ) понимается СУ, обеспечивающая на всем диапазоне частот нагрузок ЭП ГМ и собственных частот механической части близкий к единице коэффициент передачи по моменту и близкий к нулевому фазовый сдвиг. Учитывая результаты, полученные в третьей главе, показано, что для рассматриваемых ГМ данному определению для асинхронного ЭП соответствуют ПУМ и ГУ с ПИ регулятором.

Показано, что с учетом БИМ задача ресурсосберегающего управления механической частью ЭП ГМ решается включением в структуру СУ регуляторов упругих сил (моментов) и регуляторов скорости. Общая структура системы ресурсосберегающего управления ЭП ГМ, учитывающая возможность приведения в движение исполнительного органа ГМ группой из N ЭП, приведена на рис. 10, где обозначено СВУ – система взаимосвязанного управления; РС_{1,2...N} – регуляторы скорости; РУС_{1,2...N} – регуляторы упругих сил (моментов); БИМ_{1,2...N} – безынерционные источники момента, каждый из которых включает приводной двигатель, управляющий преобразователь и СУ электродвигателем; $M_{y1}^*, M_{y2}^* .. M_{yN}^*$ – заданные моменты упругих сил, формируемые каждым из N электроприводов.

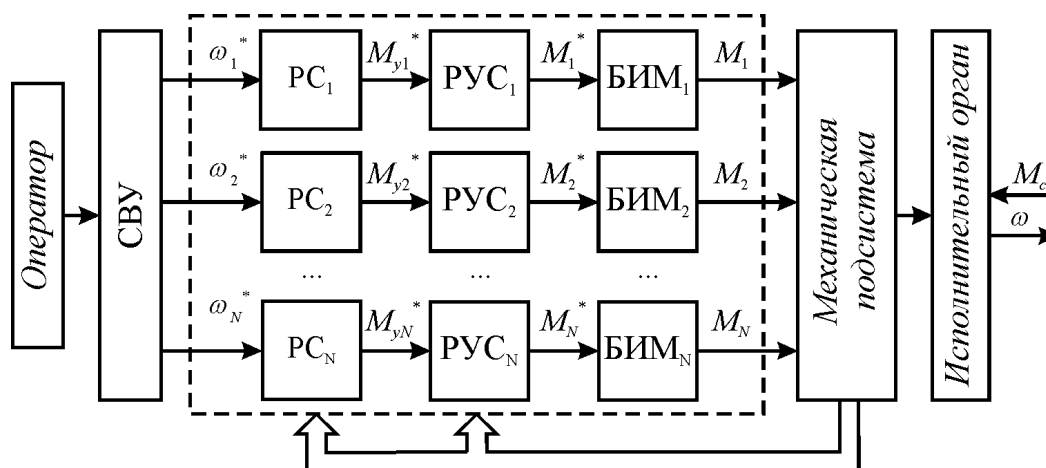


Рис. 10. Общая структура системы ресурсосберегающего управления электроприводами горных машин

Для синтеза регуляторов упругих сил и моментов (РУС) электроприводов ГМ, с учетом существенного многообразия возможных конфигураций механических подсистем, предложено использование аналитического конструирования

агрегированных регуляторов. С учетом распространенного приема математического описания механических подсистем в виде многомассовых расчетных схем с последующим упрощением до двухмассовых, рассмотрен синтез РУС на примере двухмассовой расчетной схемы:

$$M^* = M_y + \frac{J_1}{J_2}(M_y - M_c) - \frac{J_1}{C_y} \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) \dot{M}_y - \frac{J_1}{T_1 T_2 C_y} (M_y - M_y^*), \quad (14)$$

где M_y, M_y^* – текущий и заданный момент упругих сил; J_1, J_2 – моменты инерции первой и второй масс; C_y – коэффициент жесткости упругой связи; T_1, T_2 – постоянные времени РУС, определяющие скорость приближения изображающей точки к целевому инвариантному многообразию.

Посредством вычислительных экспериментов проведена проверка эффективности (14), где в качестве объекта для моделирования выступал асинхронный ЭП с ГУ и параметрами механической подсистемы, соответствующими приводу резания очистного комбайна Eickhoff SL 300, а при моделировании использовалась десятимассовая расчетная схема, построенная в соответствии с кинематической схемой его редуктора. Показано, что, несмотря на использование при синтезе РУС двухмассовой расчетной схемы, достигается управляемость моментами упругих сил во всех упругих элементах механических передач, при этом колебания $M_{y1}..M_{y9}$ не превышают 4 % от среднего значения, несмотря на изменяющуюся нагрузку в диапазоне ± 43 %.

С учетом РУС предложены варианты регуляторов скорости движения исполнительного органа (РС), к которым предъявляются противоречивые требования необходимости с одной стороны обеспечивать высокую точность регулирования в условиях резкопеременной нагрузки, а с другой – снижать динамические нагрузки за счет исключения дополнительных динамических колебаний M_y в упругих элементах.

Для разрешения указанных противоречий сформирована желаемая механическая характеристика ЭП ГМ, показанная на рис. 11 на примере двухмассовой расчетной схемы, которая имеет зону неоднозначности $\Delta\omega_{min}$, определяющую допустимые отклонения скорости исполнительного органа ω_2 от заданного значения ω_2^* , за пределами которой должно обеспечиваться движение ω_2 к ω_2^* , а в пределах – M_y должен стабилизироваться, не превышая в любом режиме допустимого значения M_y^{max} .

Предложено три варианта РС, реализующие указанную механическую характеристику:

1. Нелинейный регулятор, в котором введена дополнительная граница $\Delta\omega_{max}$, формирующий M_y^* в соответствии с зависимостью:

$$M_y^* = M_\delta^* + M_c^{cp}, \quad (15)$$

где M_δ^* – требуемый динамический момент привода; M_c^{cp} – среднее значение момента сопротивления. В нем при условии $|\omega^* - \Delta\omega_{max}| < \omega_2 < |\omega^* + \Delta\omega_{min}|$, динамический момент M_δ^* линейно сни-

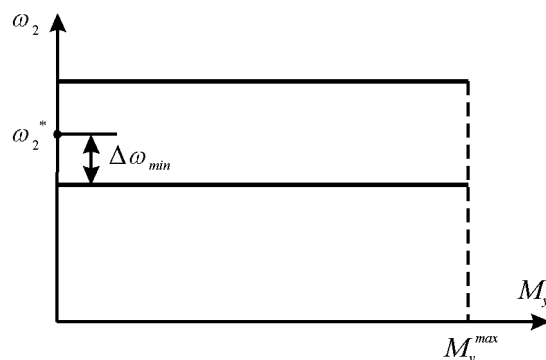


Рис. 11. Желаемая механическая характеристика ЭП ГМ

жается от максимального значения M_{ω}^{max} при $\omega_2 = |\omega_2^* - \Delta\omega_{max}|$, до нуля при $\omega_2 = |\omega_2^* - \Delta\omega_{min}|$.

Достоинством данного РС является простота, недостатком – неизбежные отклонения ω_2 от ω_2^* , обусловленные тем, что при вхождении ω_2 в границы зоны $\Delta\omega_{min}$, величина M_{ω}^* формируется равной нулю, а, соответственно, M_y^* равным M_c^{cp} , исходя из чего, исключая изменение ω_2 в силу резкопеременной нагрузки, ее среднее значение будет иметь координаты, близкие к точке входа в границы зоны $\Delta\omega_{min}$.

2. Регулятор с использованием нечеткой логики, в котором в качестве функций принадлежности для набора входных и выходных переменных выбраны кусочно-линейные функции, входными воздействиями приняты координаты ω_2 относительно границ $\Delta\omega_{min}$, а также величина и знак M_y в процентах от M_n , а выходными – M_y^* в процентах от максимально допустимого значения M_y^{max} . Входное пространство по ω_2 описано девятью лингвистическими переменными набора **A**, а входное пространство по M_y – пятью лингвистическими переменными набора **B**. Декомпозиция выходного пространства по M_y^* произведена согласно декомпозиции входного пространства по ω_2 девятью лингвистическими переменными набора **C**. Нечеткая база правил данного РС показана в табл. 2, а логическое заключение выполняется на основе операции нечеткой импликации по Ларсену. Для дефазификации выбран метод центра масс.

Таблица 2

Нечеткая база правил

Решение Q_{ij}	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9
B_1	C_9	C_8	C_8	C_7	C_6	C_5	C_4	C_2	C_1
B_2	C_9	C_8	C_7	C_7	C_6	C_5	C_3	C_2	C_1
B_3	C_9	C_8	C_7	C_6	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
B_4	C_9	C_8	C_7	C_5	C_4	C_3	C_3	C_2	C_1
B_5	C_9	C_8	C_6	C_5	C_4	C_3	C_2	C_2	C_1

Достоинством нечеткого РС является высокая точность регулирования ω_2 , а недостатком – эмпирическое определение настроечных параметров в соответствии с экспертным подходом, что может вызвать некоторые сложности, связанные с необходимостью корректировки декомпозиции входного и выходного пространств в зависимости от мощности электропривода ГМ.

3. Адаптивный регулятор, структура которого меняется в зависимости от координат ω_2 относительно границ $\Delta\omega_{min}$. При нахождении ω_2 за границами $\Delta\omega_{min}$ данный РС обладает свойствами ПИ регулятора и обеспечивает максимальное приближение рабочей точки к положению ω_2^* . При вхождении ω_2 в зону отклонения от ω_2^* на величину погрешности, равную 1 % от $\Delta\omega_{min}$, данный РС переключается на формирование постоянного выходного сигнала, значение которого M_y^{nu} равно значению M_y^* на выходе ПИ-регулятора в момент переключения. При дальнейшей работе в данном режиме сигнал обратной связи по ω_2 использовать для контроля значения ω_2 относительно $\Delta\omega_{min}$, вновь включая ПИ-регулятор при выходе за $\Delta\omega_{min}$.

Его достоинством является отсутствие необходимости в информации о нагрузке, преодолеваемой исполнительным органом ГМ, а недостатком – возможность некорректной настройки ПИ регулятора скорости для механических подсистем ЭП ГМ сложной структуры.

Для оценки эффективности предложенных РС проведена серия вычислительных экспериментов, где объектом для моделирования выступал привод резания очистного комбайна Eickhoff SL 300, а при моделировании использовалась двухмассовая расчетная схема, параметры которой получены упрощением десятимассовой. Для сравнения также выполнено моделирование с линейным РС, в качестве которого выбран ПИ регулятор с параметрами K_n и K_u равными используемым в адаптивном РС.

Установлено, что при работе нелинейного РС средневзвешенная ошибка δ_ω составляет 23 % от $\Delta\omega_{min}$, что признано неудовлетворительным, а при работе нечеткого РС и адаптивного РС – менее 1 % от $\Delta\omega_{min}$. Поскольку регулирование ω_2 для последних двух РС протекает по существенно отличающимся траекториям, для оценки обеспечиваемой ими ресурсоэффективности выполнено разложение переходных процессов по M_y в ряд Фурье. Амплитудные спектры для нечеткого РС, адаптивного РС в сравнении с ПИ регулятором приведены на рис. 12.

Для количественной оценки влияния предлагаемых РС на ресурсоэффективность ЭП ГМ использован коэффициент относительного снижения динамической нагруженности, который определяется как:

$$\lambda_{l,m} = \frac{\sum_j (A_{M_y,j})_l f_j}{\sum_j (A_{M_y,j})_m f_j}, \quad (16)$$

где l, m – индексы, показывающие принадлежность к сравниваемым РС, присвоенные в данном случае в соответствии с рис. 12; $A_{M_y,j}$ – амплитуда переменной составляющей M_y для j -й частоты спектра f_j .

Установлено, что для ЭП с адаптивным РС по сравнению с ПИ РС $\lambda_{3,1}=0,415$, а для нечеткого РС $\lambda_{2,1}=0,359$. Единичное значение этого коэффициента указывает на качественное подобие динамического поведения двух систем, а его снижение, свидетельствует об улучшении динамики исследуемого регулятора относительно сравниваемого, таким образом подтверждено снижение интенсивности истощения ресурса ЭП ГМ, обеспечиваемое при использовании предлагаемой системы ресурсосберегающего управления.

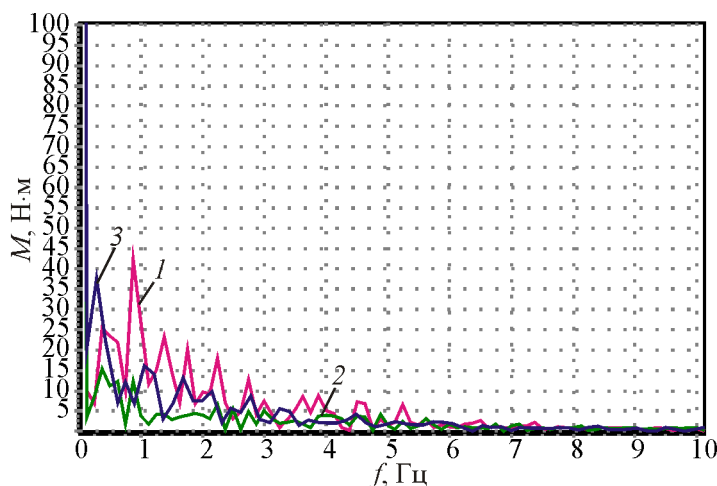


Рис. 12. Амплитудные спектры момента упругих сил при работе регулятора скорости:
1) ПИ-регулятор; 2) нечеткий регулятор;
3) адаптивный регулятор

В пятой главе изложено практическое приложение предлагаемых решений.

Для подтверждения выводов по энергоэффективности ГУ, полученных по результатам моделирования, проведено экспериментальное исследование опытного образца ПЧ с градиентным управлением, внешний вид которого представлен на рис. 13. Информационная часть ПЧ построена на отладочной плате DSP56F803, а реализация ГУ выполнена на языке C/C+. В качестве испытуемого двигателя использован АД марки 4AM80A4CY1. Результаты испытаний, приведенные на рис. 14, подтверждают высокое качество регулирования как M , так и ψ_1 . При этом отмечено, что в начале переходного процесса присутствует незначительное отклонение M от M^* , объясняющееся малой величиной ψ_1^* , настолько, что уровень намагничивания двигателя является недостаточным для развития M . Данный результат полностью согласуется с результатами моделирования при совместном изменении M^* и ψ_1^* , приведенными в третьей главе, что подтвердило их адекватность.



Рис. 13. Внешний вид ПЧ с ГУ

Вопросы ресурсосберегающего управления рассмотрены на примере ЭП магистрального ленточно-го конвейера (ЛК).

Описан частотный преобразователь лебедки конвейера (ЧПЛК), обеспечивающий бесступенчатое регулирование момента привода лебедки натяжения, контроль усилия натяжения ленты, управление тормозной системой лебедки, а также согласованность работы с автоматизированной системой управления (АСУ), внешний вид которого показан на рис. 15. ЧПЛК построен на базе ПЧ ACS800-11, обеспечивающего рекуперацию энергии в сеть, дополненного аппаратурой управления и заключенного во взрывонепроницаемую оболочку, соответствующую виду взрывозащиты РВ Exd [ia] ia I.

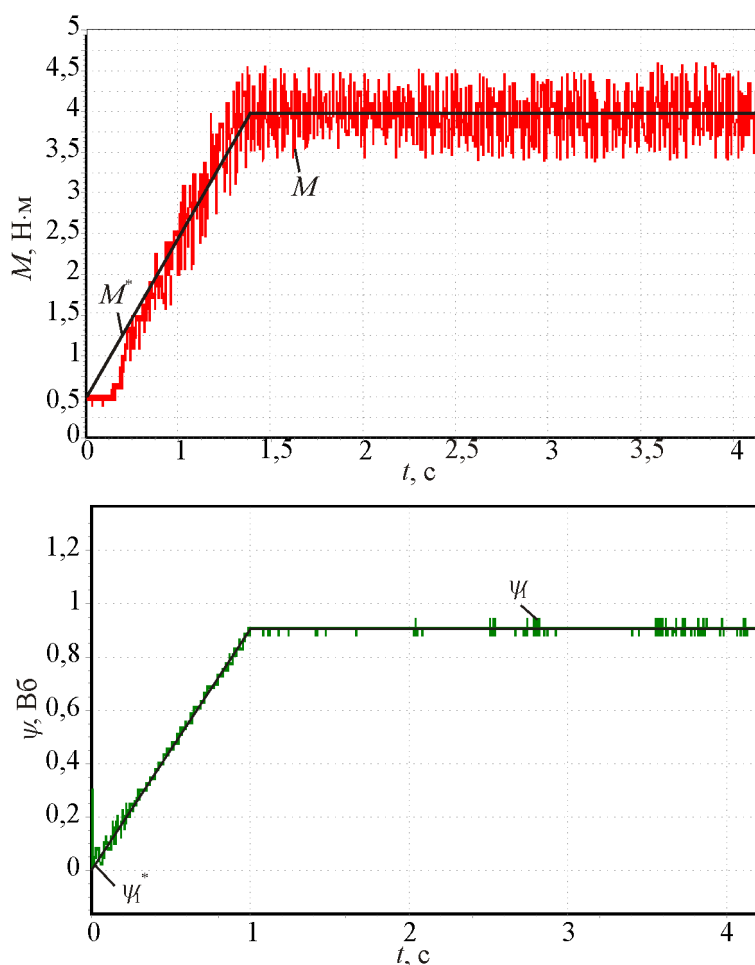


Рис. 14. Результаты испытаний градиентного управления асинхронным двигателем

Система управления ПЧ реализует прямое управление моментом.

Испытания ЧПЛК мощностью 55 кВт, изготовленного ООО «Электромашина» (г. Кемерово), проведены в ходе его пуско-наладки на магистральном ЛК шахты им. С.М. Кирова (г. Ленинск-Кузнецкий). Для примера на рис. 16 показаны переходные процессы натяжения ленты F в течение 45 минут начиная с поступления от АСУ команды на запуск при порожней ленте, подтверждающие высокую точность регулирования F . Анализ результатов работы ЧПЛК с груженой лентой также подтвердил высокую точность регулирования F . Таким образом, на примере привода натяжения магистрального ЛК подтверждена эффективность использования принципа безынерционного источника момента в составе ресурсосберегающего асинхронного ЭП горной машины на базе ПУМ.

Рассмотрен пример внедрения на шахте им. С.М. Кирова (г. Ленинск-Кузнецкий) силами ООО «Электромашина» (г. Кемерово) его продукции – совместно используемых частотно-преобразовательной станции шахтной (ЧПСШ) и ЧПЛК. Основу обоих данных устройств составляют ПЧ ACS800.

Комплекс ЧПСШ и ЧПЛК установлен на магистральном ЛК с мощностью двигателей 2х400 кВт головного привода (ГП) и 2х400 кВт промежуточного привода (ПП) и подключен в общую АСУ, отличительной особенностью которой является требование строгого выравнивания нагрузки отдельных ЭП ЛК, вызванное его высокой протяженностью и установленное для предотвращения повышенного натяжения на участках ленты, возникающего в результате колебательных переходных процессов в упругой среде. Общий уровень натяжения ленты формирует ЧПЛК, а ПЧ в составе ЧПСШ работают таким образом, чтобы

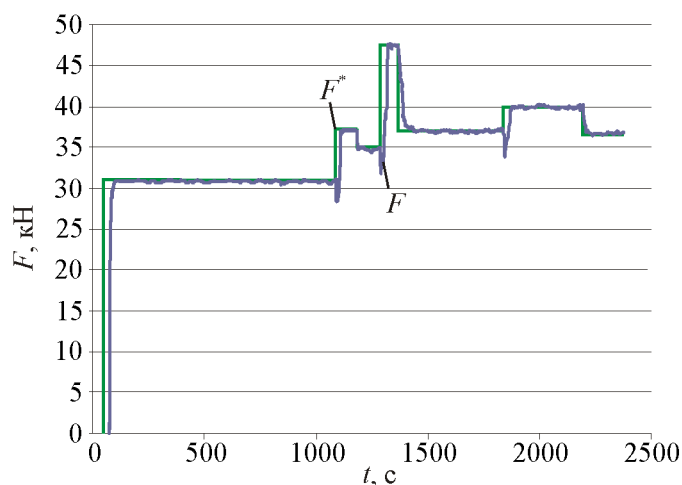


Рис. 16. Натяжение ленты конвейера

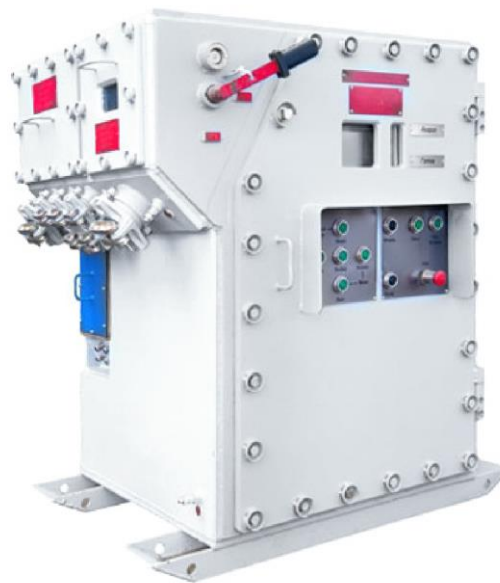


Рис. 15. Частотный преобразователь лебедки конвейера

электромагнитный момент на валу ПП с учетом транспортной задержки и грузопотока соответствовал электромагнитному моменту ГП.

Ввиду акцента на ресурсосбережении, поставленного при организации АСУ комплексом ЧПСШ и ЧПЛК, для данного магистрального ЛК задачи энергосбережения не поставлены, а электродвигатели ГП и ПП работают с постоянной угловой скоростью, отклонения которой

обусловлены лишь изменением грузопотока, а также с неизменным заданием потокосцепления статора двигателя, заложенного в ПУМ. Анализ работы электродвигателей за несколько смен работы ЛК показал, что потребляемая мощность электродвигателей составила не более 30 % от номинальной и, как следствие, ЭП имели существенно заниженный КПД.

Учитывая, что изменение скорости движения ленты не заложено в функционал АСУ ЛК, предложено одновременное регулирование электромагнитного момента и амплитуды вектора потокосцепления статора каждого из двигателей ГП и ПП, что технически реализуемо в ПЧ ACS800 и доступно предприятию изготовителю устройств ЧПСШ и ЧПЛК не вмешиваясь в технологический режим работы конвейера. Для определения соотношения между M и ψ_1 , обеспечивающего минимизацию $\Delta P_c + \Delta P_\Sigma$, использовалась методика, предложенная в третьей главе, для реализации которой проведен ряд вычислительных экспериментов.

В первой серии экспериментов устанавливалась адекватность использования математической модели $\Delta P_c + \Delta P_\Sigma$, где в качестве представительного объекта рассматривался первый двигатель ГП магистрального ЛК, для которого на основании паспортных данных определены параметры, использованные при моделировании. Исследование выполнено для режима работы ЛК, в котором средняя потребляемая мощность двигателя составляет порядка 15 % от номинальной, а грузопоток изменяется случайным образом относительно среднего значения 1050 т/ч (малая загрузка), а также для режима работы, в котором средняя потребляемая мощность составляет порядка 5 % от номинальной, а грузопоток снижается с 300 т/ч до 20 т/ч (порожняя работа). Результаты моделирования в режиме малой загрузки, приведенные на рис. 17, демонстрируют высокую степень сходимости данных, полученных экспериментально и в результате моделирования. Так, средневзвешенное расхождение мощности потерь первого двигателя ГП $\Delta P_{ГП1}$ и полученное для модели $\Delta P_c + \Delta P_\Sigma$, рассчитанное за период длительностью 100 с, не превышает 0,85 кВт, что составляет 0,21 % от $P_{ГП1н}$.

В следующей серии вычислительных экспериментов проведена количественная оценка эффекта энергосбережения, который может быть достигнут при внедрении предложенной методики минимизации $\Delta P_c + \Delta P_\Sigma$. Предварительно для данной системы ЭП численными методами получено семейство зависимостей ψ_1^* от M^* при угловой скорости, равной ω_n , минимизирующее $\Delta P_c + \Delta P_\Sigma$.

Следующим этапом проведены вычислительные эксперименты при внешних условиях идентичных режимам малой загрузки и порожней работы, но в одном случае соответствующие

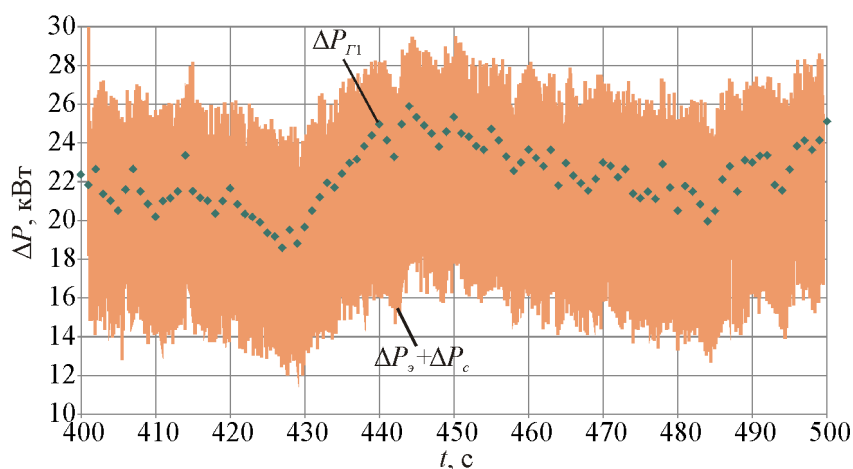


Рис. 17. Мощность потерь в режиме малой загрузки

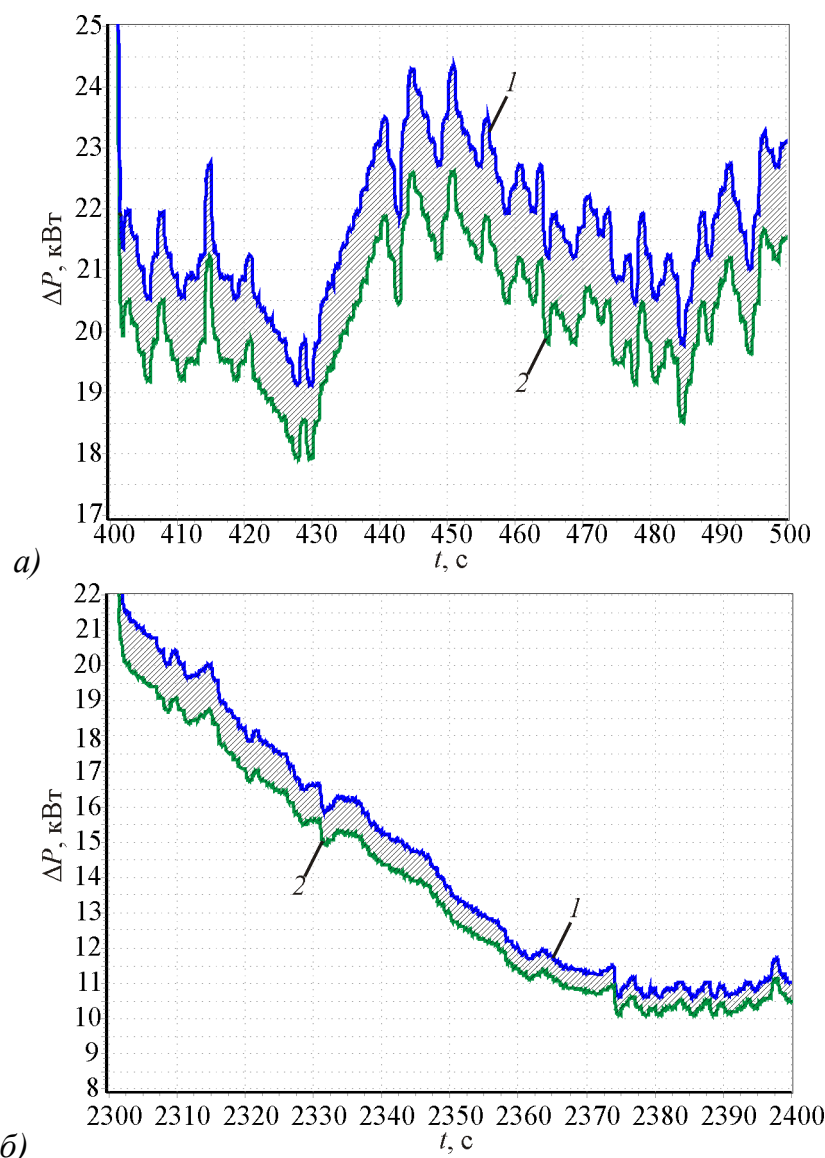


Рис. 18. Мощность потерь в режиме:
а) малой загрузки; б) порожней работы

постоянному ψ_1^* , а в другом — ψ_1^* , изменяющемуся в соответствии с M^* . Совмещенные графики для обоих случаев показаны на рис. 18, где обозначено 1 — постоянное ψ_1^* , 2 — зависимое ψ_1^* . Заштрихованная область между графиками показывает полученный эффект энергосбережения.

Показано, что в режиме порожней работы полученный эффект от энергосбережения оказался ниже, что объясняется высокой долей ΔP_c , мощность которых содержит постоянную составляющую, зависящую от среднего значения частоты коммутации полупроводниковых ключей управляющего преобразователя. Так-

же отмечено, что эффект энергосбережения, по мере повышения нагрузки двигателя, снижается что вызвано влиянием насыщения магнитопровода двигателя и ограничением величины прикладываемого напряжения.

Количественная оценка показала, что средний эффект энергосбережения составил от 0,7 кВт в режиме порожней работы до 6,8 кВт при потребляемой мощности порядка 70 % от $P_{ГПн}$. Эффект энергосбережения по всем двигателям ГП и ПП магистрального ЛК, полученный от внедрения предложенных мероприятий по регулированию потокоцепления статора составил порядка 180 000 кВт·ч в год, что с учетом средней рыночной цены на электроэнергию составляет приблизительно 0,35..0,41 миллиона рублей в год при отсутствии необходимости в капитальных затратах.

Полученный результат подтвердил, что предлагаемая методика минимизации $\Delta P_c + \Delta P_\Sigma$, используемая при параметрировании ПЧ ACS800, позволяет

снизить энергопотребление частотно-регулируемых ЭП ЛК, исходя из чего она принята для внедрения в ОАО «СУЭК-Кузбасс» (г. Ленинск-Кузнецкий).

Дополнительно отмечено, что внедрение предлагаемой методики позволит, не только снизить затраты предприятия на электроэнергию, но и вероятность преждевременных отказов электрооборудования, более эффективно используя его габаритную мощность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований дано решение актуальной научной проблемы повышения энерго- и ресурсоэффективности электроприводов горных машин, имеющее важное теоретическое и практическое значение и являющееся существенным вкладом в развитие теории управляемых электромеханических систем горных машин.

Основные научные и практические результаты выполненной работы заключаются в следующем:

1. Разработан обобщенный алгоритм градиентного управления и проведена его адаптация для наиболее распространенных в горнодобывающей промышленности типов двигателей, а также получены модификации, учитывающие ограничение подводимого к двигателю напряжения и многодвигательное исполнение электроприводов.

2. Определены показатели качества регулирования для градиентного управления при различном характере входящих в его состав регуляторов и показано, что их применение при соответствующей настройке позволяет обеспечить точность регулирования, как электромагнитного момента, так и потокосцепления с ошибкой в пределах 1..2 %.

3. Получено математическое описание, позволяющее производить количественную оценку мощности потерь электропривода, включая определение мощности потерь в стали двигателя переменного тока в зависимости от динамического состояния двигателя, учитывающее мгновенные значения составляющих векторов потокосцепления статора и ротора, а также напряжения, подводимого к двигателю.

4. Предложена система энергооптимального градиентного управления электродвигателем переменного тока с оптимизацией на этапе синтеза структуры, обеспечивающая снижение мощности электрических потерь и мощности потерь в стали посредством выбора весовых коэффициентов. Ее применение позволяет снизить электрические потери на 7 %, а магнитные на 26 % при повышении ошибки регулирования электромагнитного момента в пределах 5 %.

5. Получены аналитические выражения для отыскания оптимальных значений заданных амплитуд векторов потокосцепления статора и ротора двигателя переменного тока, минимизирующие электрические потери и потери в стали для конкретных величин заданного электромагнитного момента и позволяющие организовать систему энергооптимального управления электродвигателем на этапе формирования задания.

6. Предложена методика минимизации суммарной мощности электри-

ческих потерь и потерь в стали на базе результатов компьютерного моделирования, применяемая к системам управления электродвигателями переменного тока с возможностью регулирования их состояния, к которым относятся как градиентное управление, так и векторное управление и прямое управление моментом.

7. Выполнен анализ энергетических и динамических характеристик асинхронного электропривода, построенного на базе различных систем управления, показавший, что в диапазоне частот изменения заданного электромагнитного момента выше 1 Гц наименьшие потери энергии в пределах 5 % достигаются при градиентном управлении, и наименьшая ошибка регулирования в пределах 0,5..1 % – для градиентного управления и прямого управления моментом. Указанные системы управления рекомендованы в качестве безынерционного источника момента применительно к электроприводам горных машин.

8. Разработаны новые регуляторы скорости движения исполнительного органа горной машины, позволяющие обеспечить снижение переменной составляющей моментов упругих сил в механических подсистемах электроприводов на 58 % при применении адаптивного регулятора скорости и на 64 % при применении нечеткого регулятора скорости, повышая ресурс эксплуатации горных машин.

9. Проведены экспериментальные исследования опытного образца преобразователя частоты с градиентным управлением моментом асинхронного электродвигателя, подтверждающие адекватность выводов о его работоспособности и точности регулирования в пределах 1,25 %.

10. Доказана эффективность подхода к системе управления электродвигателем как к безынерционному источнику моментом применительно к горным машинам на примере частотного преобразователя лебедки конвейера, обеспечивающего регулирование усилия натяжения ленты магистрального ленточного конвейера с ошибкой не более 5,5 %.

11. Проведен количественный анализ эффекта энергосбережения от внедрения предлагаемых решений на примере электроприводов магистрального ленточного конвейера в размере 0,35..0,41 миллиона рублей в год при отсутствии необходимости в капитальных затратах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих периодических изданиях

1. Завьялов В.М. Многокритериальное управление асинхронным электроприводом / В.М. Завьялов, А.А. Неверов, И.Ю. Семькина // Вестн. КузГТУ. – 2005. – №1 – С.81-84.

2. Завьялов В.М. Энергооптимальное управление скоростью асинхронного электропривода / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Вестн. КузГТУ. – 2005. – №4-2 – С.21-23.

3. Семькина И.Ю. Сравнительный анализ систем регулирования угловой скорости асинхронного электродвигателя / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов // Вестн. КузГТУ. – 2005. – №6. – С. 61-66.

4. Стародуб А.В. Реализация системы регулирования угловой скорости асинхронного электродвигателя на основе метода скоростного градиента / А.В. Стародуб, И.Ю. Семькина // Вестн. КузГТУ. – 2005. – №6. – С. 69-72.
5. Семькина И.Ю. Применение нечеткой логики в задаче регулирования угловой скорости исполнительных органов горных машин / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов // Вестн. КузГТУ. – 2006. – №3. – С. 80-83.
6. Семькина И.Ю. Повышение эффективности подавления упругих колебаний в элементах трансмиссии горных машин / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, И.А. Куприянов // Вестн. КузГТУ. – 2006. – №4. – С. 83-85.
7. Завьялов В.М. Математическая модель механической части взаимосвязанных электроприводов напора и подъема карьерного экскаватора / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 3. – С. 40-43.
8. Семькина И.Ю. Градиентное управление многодвигательным асинхронным электроприводом / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, М.А. Глазко // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 65-69.
9. Семькина И.Ю. Градиентное управление в решении основных задач электропривода // Вестн. КузГТУ, 2010. – №1 – С. 99-103.
10. Семькина И.Ю. Многокритериальное управление машиной двойного питания с оптимизацией по энергетическим критериям / И.Ю. Семькина, С.Г. Нехлебова // Вестн. КузГТУ. – 2011. – № 6. – С. 40-44.
11. Семькина И.Ю. Энергетические и динамические характеристики регулируемого асинхронного электропривода / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, С.Г. Нехлебова // Вестн. КузГТУ. – 2011. – № 6. – С. 45-49.
12. Семькина И.Ю. Современное состояние и тенденции развития энергосберегающих электроприводов горных машин // Горное оборудование и электромеханика. – 2012. – № 9. – С. 23-29.
13. Семькина И.Ю. Градиентное управление электроприводом с учетом ограничения питающего напряжения // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 5. – С. 149-153.
14. Семькина И.Ю. К вопросу о математическом описании потерь в стали электродвигателей переменного тока // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/111-10110> (дата обращения: 19.09.2013).

Публикации в изданиях, не входящих в перечень ВАК

15. Завьялов В.М. Подавление упругих колебаний в горных машинах с асинхронным электроприводом / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. Вып. 12. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С. 247-252.
16. Завьялов В.М. Новый подход к построению высокоэффективных систем управления для электроприводов горных машин / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – С. 206-209.
17. Семькина И.Ю. Испытательный комплекс для оценки режимов работы электроприводов горных машин / И.Ю. Семькина, А.В. Киселев, Р.А. Коль-

цов // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2012. – № 9(75). – С 82-87.

18. Семькина И.Ю. О разработке автоматизированной системы для диагностирования состояния электроприводов горных машин / И.Ю. Семькина, Р.А. Кольцов, Гаргаев А.Н. // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2013. – № 5. – С 236-241.

Публикации по итогам конференций

19. Семькина И.Ю. Многокритериальное управление асинхронным электродвигателем / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов // Доклады юбилейной 50-й научно-практической конференции, 18-23 апр. 2005. – Кемерово: КузГТУ, 2005. – С. 93-95.

20. Завьялов В.М. Использование метода скоростного градиента в задаче синтеза систем управления асинхронными электроприводами / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Электротехнические преобразователи энергии: Материалы международной научно-технической конференции, 20-22 октября 2005. – Томск: ТПУ, 2005. – С. 233-236.

21. Семькина И.Ю. Исследование динамических свойств нелинейного регулятора момента асинхронного двигателя / И.Ю. Семькина, А.Н. Шариков // Современные техника и технологии: Труды XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 27-31 марта 2006. – Томск: ТПУ, 2006. – Т. 1. – С. 287-289.

22. Семькина И.Ю. Исследование динамических свойств регуляторов момента асинхронного двигателя / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов // Доклады 51-й научно-практической конференции, 17-21 апр. 2006. – Кемерово: КузГТУ, 2006. – С. 116-117.

23. Завьялов В.М. Стабилизация упругого момента в двухмассовой механической системе / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина, И.А. Куприянов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды третьей всероссийской научно-практической конференции, 16-18 мая 2006. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 98-101.

24. Завьялов В.М. Влияние переменной составляющей нагрузки привода вращения бурового станка СБШ-270-ИЗ на ресурс элементов его трансмиссии / В.М. Завьялов, А.Н. Шариков, И.Ю. Семькина // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды третьей всероссийской научно-практической конференции, 16-18 мая 2006. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 118-121.

25. Завьялов В.М. Безынерционный источник момента на базе асинхронного электропривода / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: Труды третьей всероссийской научно-практической конференции, 16-18 мая 2006. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 121-124.

26. Завьялов В.М. Анализ отказов карьерных экскаваторов / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибирский ресурс 2006: Материалы XI Международной научно-практической конференции, 23-24 нояб. 2006. – Кемерово: КузГТУ, 2006. – С. 179-180.

27. Завьялов В.М. Моделирование механической части электроприводов напора и подъема карьерного экскаватора / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-20: Сб. трудов XX Международной научной конференции, 28-31 мая 2007. – Ярославль: Яросл. гос. техн. ун-т, 2007. – Т. 4. – С. 173-177.

28. Завьялов В.М. Идентификация механической подсистемы электроприводов напора и подъема карьерного экскаватора / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: Труды I Всероссийской научно-технической конференции. – Кемерово: КузГТУ, 2007. – С. 335-339.

29. Завьялов В.М. Использование безынерционного источника момента в системах управления электроприводов со сложными механическими подсистемами / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2007: материалы третьей научно-технической конференции с международным участием, 25-26 окт. 2007. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – С. 69-72.

30. Завьялов В.М. Повышение эффективности электроприводов горных машин / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Электромеханические преобразователи энергии: материалы международной научно-технической конференции, 17-19 октября 2007. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 293-295.

31. Завьялов В.М. Оценка состояния электроприводов экскаваторов / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Электромеханические преобразователи энергии: материалы международной научно-технической конференции 17-19 октября 2007. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 296-298.

32. Завьялов В.М. Новый способ снижения вибраций буровых станков / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина, И.А. Куприянов // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: материалы VII международной научно-практической конференции, 15-16 ноября 2007. – Кемерово: КузГТУ, 2007. – Т. 1. – С. 114-116.

33. Zavyalov Valeriy M. Raising efficiency of mining machines by improvement of electric drives / Valeriy M. Zavyalov, Irina Yu. Semykina // Advances in geotechnical and structural engineering: proceedings of fifth China-Russia symposium on underground and building engineering of city and mine, 26-28 September 2008. – Qingdao, China: China University of Mining and Technology Press. – P. 445-448.

34. Лапина О.А. Управление электромагнитным моментом асинхронного двигателя на базе общепромышленного преобразователя частоты / О.А. Лапина, В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Современные техника и технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 4-8 мая 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 434-436.

35. Субботин С. А. Особенности технической реализации скалярного градиентного управления / С. А. Субботин, В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина // Современные техника и технологии: сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 4-8 мая 2009. – Томск: ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 482-484.

36. Семькина И.Ю. Градиентное управление процессом электромеханического преобразования энергии / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов // Электромеханические преобразователи энергии: материалы международной научно-технической конференции, 17-19 октября 2007. – Томск: ТПУ, 2007. – С. 293-295.

ханические преобразователи энергии: материалы IV Международной научно-технической конференции, 13-16 октября 2009 г. – Томск: ТПУ, 2009. – С. 203-206.

37. Семькина И.Ю. Градиентное управление моментом асинхронного двигателя на базе общепромышленного преобразователя частоты / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды VII Всероссийской научно-практической конференции, 12-14 ноября 2009. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 241-246.

38. Семькина И.Ю. Управление несколькими асинхронными электродвигателями от одного преобразователя частоты / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, М.А. Глазко // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: труды VII Всероссийской научно-практической конференции, 12-14 ноября 2009. – Новокузнецк: СибГИУ, 2009. – С. 246-252.

39. Семькина И.Ю. Ресурсосберегающее управление двигателями постоянного тока приводов подъема и напора карьерного экскаватора // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2010: материалы XIII Международной научно-практической конференции, 28-29 октября 2010. – Кемерово: КузГТУ, 2010. – Т. 2. – С. 74-77.

40. Семькина И.Ю. Энергооптимальное градиентное управление электроприводом // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в образовании, науке и производстве: труды IV Всероссийской научно-практической конференции, 12-15 октября 2010. – Новокузнецк: СибГИУ, 2010. – С. 148-151.

41. Семькина И.Ю. Энергооптимальные режимы работы полностью управляемой машины переменного тока // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г.А. Сипайлова, 12-14 октября 2011. – Томск: ТПУ, 2011. – С. 250-253.

42. Семькина И.Ю. Анализ вариантов энергосберегающих электроприводов горных машин // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, 1-2 ноября 2012. – Кемерово: КузГТУ, 2012. – С. 71-74.

43. Семькина И.Ю. Энергетическая оптимизация работы машины двойного питания через управление ее состоянием // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2012: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, 1-2 ноября 2012. – Кемерово: КузГТУ, 2012. – С. 74-77.

44. Семькина И.Ю. Условия достижимости целей градиентного управления электроприводом // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в образовании, науке и производстве: труды V Всероссийской научно-практической конференции, 20-22 ноября 2012. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – С. 104-108.

45. Семькина И.Ю. Испытательный комплекс для имитации нагрузок асинхронного электропривода / И.Ю. Семькина, А.В. Киселев, Р.А. Кольцов // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в образова-

нии, науке и производстве: труды V Всероссийской научно-практической конференции, 20-22 ноября 2012. – Новокузнецк: СибГИУ, 2012. – С. 109-113.

46. Семькина И.Ю. Повышение энергетической эффективности частотно-регулируемых электроприводов магистральных ленточных конвейеров угольных шах // «Наука и образование – ведущий фактор Стратегии «Казахстан–2050» (Сагиновские чтения №5): тезисы международной научно-практической конференции, 20-21 июня 2013. – Караганда: КарГТУ, 2013. – С 294-297.

Объекты интеллектуальной собственности

47. Способ управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя: пат. 2306666 Рос. Федерация: МПК7 H02P 21/12, H02P 27/06 / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина, А.В. Стародуб; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технический университет". – № 2005140130/09; заявл. 21.12.05; опубл. 20.09.07, бюл. № 26.

48. Сдвоенный асинхронный электродвигатель: пат. 2410821 Рос. Федерация: МПК7 H02K 17/34, H02K 16/00 / И.Ю. Семькина, В.М. Завьялов, И.А. Куприянов; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технический университет". – № 201010067/07; заявл. 11.01.10; опубл. 27.01.11, бюл. №3.

49. Способ частотного управления электромагнитным моментом асинхронного двигателя: пат. 2414806 Рос. Федерация: МПК7 H02P21/00, H02P27/04, H02P27/08 / В.М. Завьялов, И.Ю. Семькина, О.А. Лапина, С.А. Субботин; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кузбасский государственный технический университет". – № 2010116321/07; заявл. 23.04.10; опубл. 20.03.11, бюл. №8.

50. Программный продукт для сравнения типовых систем управления асинхронным электроприводом: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2012611705 / И.Ю. Семькина; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева». – № 2011619646; заявл. 15.12.11; зарегистр. 15.02.2012.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, заключается в следующем:

[1, 15, 16, 19, 20, 22, 24, 25, 29, 30, 32, 33, 48] – разработка компьютерных моделей, проведение вычислительных экспериментов, общий анализ;

[2, 3, 10, 11, 17, 18, 21, 26, 45] – постановка задач исследований, обработка результатов;

[4, 34, 35, 37, 47, 49] – проектирование технических решений, обработка результатов;

[5-8, 23, 27, 28, 31, 36, 38] – разработка основных теоретических положений, выполнение расчетов.