

На правах рукописи



АНУЧИН АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ
КОМПЛЕКТОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва 2018

Работа выполнена на кафедре автоматизированного электропривода федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Официальные оппоненты: Сарач Евгений Борисович

доктор технических наук, профессор кафедры «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана».

Саушев Александр Васильевич

доктор технических наук, заведующий кафедрой электропривода и электрооборудования береговых установок ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»

Виноградов Анатолий Брониславович

доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2018 г. в аудитории М-606 в 13-00 на заседании диссертационного совета МЭИ.002 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корпус М.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый Совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, с3 и на сайте www.mpei.ru.

Автореферат разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МЭИ.002
к.т.н., доцент Цырук С.А.

С.А. Цырук

Актуальность темы

В соответствии с директивами разных стран поставлена задача перевода автомобильного транспорта на электрическую тягу. Так, в Государственной программе РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» присутствует раздел «Реализация мероприятий в автомобильном транспорте», в котором предусмотрено: «Стимулирование покупки гибридных и малолитражных автомобилей»: получение средневзвешенной топливной эффективности легковых автомобилей – 11,19 кг у.т./100 км (в т.ч. работающих на бензине – 7,97 л/100 км; на дизельном топливе – 5,98 л/100 км). По указанной Программе доля легковых автомобилей с гибридными установками среди продаваемых новых автомобилей к 2020 году должна составить 4,6 %.

Что касается Европы, то их прогнозы значительно оптимистичнее, однако пока неясно, как будет обеспечена зарядная инфраструктура городов, когда количество электромобилей приблизится к 100%. Необходимо быстро модернизировать электроснабжение целых городов, направив в ночное время туда электрическую энергию, в 3,7 раза превосходящую текущее потребление электричества промышленным сектором. Эта задача реализуема, но потребует строительства электростанций, систем хранения электроэнергии, трансформаторных подстанций и систем электроснабжения наряду с огромной инфраструктурой зарядных станций. Сегодня лишь Нидерланды (~126 000 электромобилей и заряжаемых гибридов и ~34 400 зарядных станций) и Норвегия (~200 000 электромобилей и заряжаемых гибридов и ~9 000 зарядных станций) начали масштабную модернизацию.

Вместе с тем, значительной экономии топлива можно добиться с применением гибридных технологий, которые необязательно должны быть связаны с ископаемым топливом и могут адаптироваться под водородное или биологическое топливо. При этом для России гибридные технологии в отдельных случаях могут быть значительно интереснее чисто электрических, так как иногда просто необходимо сжигать больше топлива, чем требуется для перемещения, чтобы обогреть салон и создать комфортные для вождения условия. Кроме того, гибридные транспортные средства сохраняют существующую инфраструктуру заправок.

Существуют несколько типов гибридных транспортных средств (ТС), которые более укрупненно разделяют на последовательные и параллельные гибриды. В последовательном гибриде энергия от первичного источника, например, двигателя внутреннего сгорания (ДВС), полностью преобразуется в электрическую энергию, а затем передается на колеса машины. Часть её также может быть запасена в накопителях энергии, таких как суперконденсаторы, аккумуляторы или маховиковые накопители. В параллельном гибриде механическая энергия ДВС напрямую подводится к колесам, а её избыток или недостаток компенсируются за счет электропривода. Функциональные схемы трансмиссий представлены на рис. 1.

Необходимо понимать, что параллельные гибриды возникли, когда появилось желание гибридизировать относительно небольшие дорожные машины, но технической возможности создать компактный тяговый электропривод на полную мощность, требуемую на колёсах, не было. Сейчас, когда созданы полностью электрические автомобили, гибридные трансмиссии становятся исключительно последовательными. Например, автомобиль BMW i3, который, являясь

полностью электрическим автомобилем, может комплектоваться устройством расширения дальности хода (Range Extender), являющимся бензиновой генераторной установкой на 20 кВт. В таком режиме электромобиль становится последовательным гибридом с неограниченной дальностью хода. Основными достоинствами последовательных гибридных трансмиссий принято считать:

- Отсутствие механической или гидравлической трансмиссии, которая требует дополнительного обслуживания и снижает надежность транспортного средства.
- Возможность выведения ДВС в оптимальный режим с точки зрения расхода топлива для любой требуемой нагрузки на колесах.
- Возможность сглаживания нагрузок ДВС и аккумулялирование избытков энергии в промежуточном накопителе, таком как аккумуляторные батареи, суперконденсатор или маховиковый накопитель.
- Повторное использование энергии торможения, которая также может быть запасена в накопителе энергии.

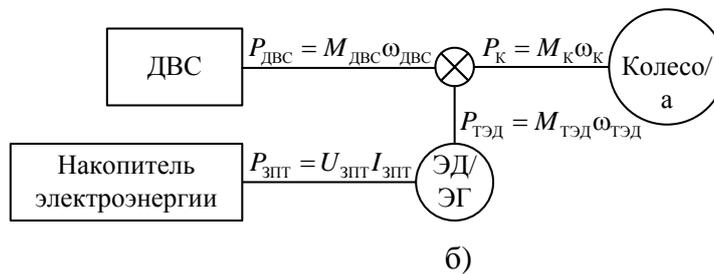
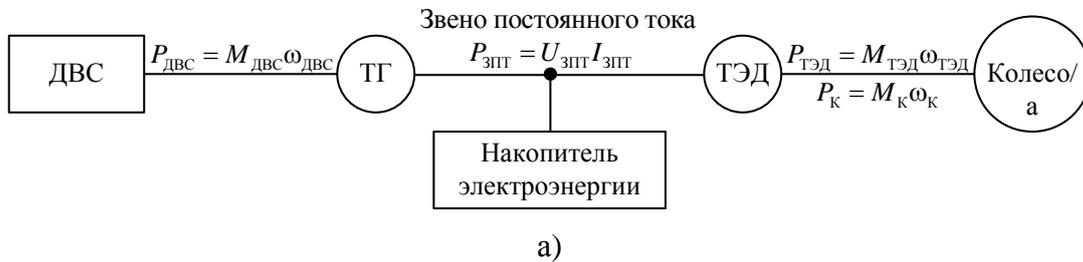


Рис. 1. Различные схемы гибридных трансмиссий: а) последовательная, б) параллельная.

Снижение расхода топлива, обусловленное последними тремя особенностями, является важнейшим преимуществом, так как не только повышает экологичность ТС, но и повышает его живучесть в случае военного использования. Так, по анализу опыта войны США в Афганистане цена за литр топлива во время ведения боевых действий превышает 100 USD. Эта цена включает в себя множество расходов, таких как доставка топлива цистернами при сопровождении их конвоем, потери техники в процессе доставки, демаскировка позиций и сопровождающие её потери техники и личного состава, выплата пенсий.

Эти факторы привели к разработке разными странами гибридных ТС специального назначения. Так, в США ведутся работы по созданию Heavy Expanded Mobility Tactical Truck (HEMTT) в версии АЗ с гибридной трансмиссией последовательного типа. Кроме основной функции на борту американской высококомобильной платформы имеется электростанция мощностью 200 кВт, которой достаточно для обеспечения электричеством аэродрома, полевого госпиталя, штаба или небольшого поселка. Вместе с тем, на данный момент, судя по открытым источникам, процесс постановки на производство гибридной версии не завершен.

Согласно сценарию Международного энергетического агентства в 2050 г. из всего действующего парка легких автомобилей 85% будут оснащены гибридными системами трансмиссии. Также в этом сценарии гибридными трансмиссиями будет оснащено чуть более трети (35%) среднетоннажных грузовиков и порядка 75% автобусов. Повышение эффективности в результате внедрения гибридных систем позволит сэкономить 265 млн. тонн нефти. Продажи всех автомобилей в мире в 2014 г. выросли на 3,6% и достигли 71,15 млн. штук, а рост продаж электромобилей составил 50% и достиг 306 тыс. штук (0,4% от всех продаж). Наибольшая доля электромобилей и гибридов продается в Норвегии — 51,4% от продаж.

К сожалению, состояние российских разработок в этой области оставляет желать лучшего. Научные работы велись профильными институтами НАМИ, НАТИ, МГТУ им. Баумана, однако практически ни одна из разработок не была внедрена в массовое производство. Это можно объяснить попыткой компоновать трансмиссию из готовых импортных блоков, которые не могут работать вместе столь же эффективно, как проработанные специально под конкретную задачу. Кроме того, комплект для легковых автомобилей, внедренный в машине EL Lada АО «АвтоВАЗ», изначально содержал в себе устаревшие импортные элементы (некоторые уже не производятся), а после кризиса 2014 года увеличение стоимости сделало производство таких автомобилей бесперспективным.

Больших успехов достигли группы ученых, которые пришли из электротяги и электропривода, так как они в лучшей степени понимали вопросы выбора мощности и организации взаимодействия между компонентами трансмиссии, а также разрабатывали практически все элементы самостоятельно, имея доступ к формированию требуемых характеристик. Например, предприятия Российского электротехнического концерна «РУСЭЛПРОМ» — ООО «Русэлпром — Электропривод» и ОАО «НИПТИЭМ» по заказу ООО «ЛиАЗ» (дивизион «Автобусы» группы «ГАЗ») выполнили разработку комплекта тягового электрооборудования (КТЭО) для городского маршрутного автобуса на основе новой модели низкопольного городского автобуса ЛиАЗ-5292. Под руководством д.т.н. А.Б. Виноградова была разработана трансмиссия грузовиков БЕЛАЗ-90 и БЕЛАЗ-240 и гусеничного трактора. Если «РУСЭЛПРОМ» ориентирован на использование асинхронных тяговых электроприводов, то в Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) имени М.И. Платова группа д.т.н. С.А. Пахомина ведет разработки на базе вентильно-индукторных электродвигателей.

МЭИ и предприятия, организованные его сотрудниками, ООО «НПП «ЦИКЛ ПЛЮС» и ООО «НПФ «ВЕКТОР» выполнили ряд успешных работ на базе вентильно-индукторной машины с независимым возбуждением, разработанной к.т.н. А.М. Русаковым. Были выполнены НИР «Крымск» по созданию 8-колесного транспортного средства с индивидуальным приводом на каждое колесо на базе БТР-90, разработаны и поставлены НТЦ ПАО «КАМАЗ» опытные образцы блоков управления комплектом тягового электрооборудования многоосных колёсных машин большой грузоподъемности, в том числе с системой управления тягового привода на базе отечественного микроконтроллера K1921BK01T, инициативная работа совместно с ПК ЗТЭО (г. Набережные Челны) по созданию трансмиссии карьерного самосвала БЕЛАЗ-90.

С учетом отечественного и мирового опыта можно выделить следующие направления развития гибридного транспорта:

- Увеличение ёмкости накопителей энергии на борту (суперконденсаторов, аккумуляторов и т.д) и скорости их зарядки с целью повышения автономности ТС.
- Повышение КПД тяговых электроприводов с целью сокращения массы элементов охлаждения, веса ТС и увеличения дальности хода.
- Удешевление тяговых электроприводов за счет правильного выбора типа и мощности двигателя, систем бездатчикового (самосенсорного) управления.
- Оптимизация параметров компонент гибридных трансмиссий для типовых циклов работы ТС (городской, загородный).
- Оптимизация КПД существующих и поиск новых первичных источников энергии и преобразователей её в электрическую.
- Развитие технологий бесконтактной зарядки и электроснабжения гибридных и полностью электрических транспортных средств.
- Совершенствование алгоритмов и систем управления, обеспечивающих согласованное взаимодействие компонентов тягового электропривода.

Анализ многочисленных источников информации, относящейся к перечисленным выше основным направлениям развития гибридного транспорта, показал, что имеется ряд вопросов, которые не были проработаны или в полной мере освещены в научной литературе в России и за рубежом. Это:

- вопросы взаимодействия элементов гибридной трансмиссии друг с другом,
 - анализ характеристик тяговых электроприводов и формулировка рекомендаций по их применению в зависимости от требований к трансмиссии,
 - вопросы реализации самосенсорного управления тяговых электроприводов,
 - повышение надежности трансмиссии средствами системы управления,
 - вопрос реализации систем управления на отечественной элементной базе;
- что позволило сформулировать цель диссертационного исследования.

Цель работы: Повышение эффективности взаимодействия элементов и работы гибридных электротрансмиссий автономного колесного транспорта средствами системы управления.

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо **решить следующие задачи:**

1. Определить базовые требования к тяговому электроприводу, провести классификацию и определение предельных тяговых механических характеристик для всех основных типов электроприводов. Определить рациональные области применения конкретных типов тяговых электродвигателей и реализовать системы управления ими.
2. Разработать модульную структуру гибридной трансмиссии и определить базовые принципы взаимодействия её элементов с точки зрения энергетического баланса и сетевого взаимодействия. Разработать алгоритмы распределения тяговых усилий и систем помощи водителю.
3. Разработать системы измерения положения тяговых электроприводов для типовых датчиков положения, применяемых в транспорте. Реализовать самосенсорные системы управления для тягового электропривода с синхронными электрическими машинами.

4. Разработать сетевые решения для коммуникации различного уровня между элементами гибридной трансмиссии. Разработать средства для отладки систем управления трансмиссии и поиска неисправностей.
5. Разработать методы повышения надежности тягового электрооборудования средствами системы управления на этапе производства компонентов и в процессе эксплуатации.
6. Реализовать импортозамещение в области систем управления тяговых электроприводов за счет применения новых отечественных микроконтроллеров.

Сформулированные задачи были поставлены и решены в настоящей диссертационной работе при реализации НИР «Крымск», при создании электро-трансмиссии многоосных колёсных машин большой грузоподъемности НТЦ ПАО «КАМАЗ», трансмиссии полностью электрического автобуса «Волгабус», автономного микроавтобуса «Матрёшка», карьерного самосвала БЕЛАЗ-90 и др.

Работа выполнялась в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»), г. Москва, в период с 2005 г. по 2018 г. и соответствует направлениям «Транспортные и космические системы» и «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» перечня **«Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации**, утвержденного Указом Президента Российской Федерации N 899 от 7 июля 2011 года, **а также** «Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления новыми видами транспорта» и «Технология энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии».

Проведению исследований по данной тематике способствовало выполнение с непосредственным участием автора НИР в ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по темам:

1. За счет гранта Российского научного фонда «Разработка теории и алгоритмов самосенсорного управления тяговых электроприводов вентильно-индукторного типа с независимым возбуждением» (проект № 16-19-10618).
 2. За счет гранта Российского научного фонда «Разработка усовершенствованных алгоритмов управления и методов модуляции для минимизации потерь в электроприводах переменного тока» (проект № 15-19-20057) по договорам с ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва» в 2015–2017 гг.
- Экспериментальные исследования статических и динамических характеристик электропривода на базе синхронной машины с электромагнитным возбуждением (договор № 2110150);
 - Проведение части эксперимента для анализа и выбора метода разрывной функции (договор № 2053160).
 - Реализация управления силовым преобразователем. Разработка имитационной модели силового преобразователя (договор № 2126160).
 - Экспериментальные исследования удельных показателей электромеханических преобразователей разного типа (договор № 2026170).
 - Разработка алгоритмов широтно-импульсной модуляции с компенсацией нелинейностей при алгоритмах управления со снижением коммутационных потерь (договор № 2108170).

3. НИР «Разработка научных основ создания энергоэффективных систем силовой электротехники для точного и отказоустойчивого управления движением технологических механизмов», выполняемая в рамках Госзадания в 2012–2014 гг. (регистрационный номер НИР: 7.5000.2011).
4. НИР «Разработка теории энергоэффективного выбора электродвигателей с использованием численных методов», выполняемая в 2012 – 2013 гг. по гранту РФФИ № 12-08—31268-мол_а_2012 (договор № 3065120).
5. НИР «Разработка методологии синтеза цифровых систем управления в электротехнических комплексах» (проект №8.8313.2017/БЧ).

В рамках работ, выполненных ООО «НПФ «ВЕКТОР»:

1. Договор №03_Ц/10 от 01.03.2010 на выполнение составной части опытно-конструкторской работы «Разработка распределенной микропроцессорной системы управления нижнего уровня для электротрансмиссии колесной машины» (шифр «Крымск-Вектор»).
2. Договор №02/Ц16 от 15.03.2016 на ОКР «Создание системы управления тягового электропривода электробуса и сопряжение системы управления с электрооборудованием электробуса».
3. Договор №3_Ц/07 от 20.03.2007 на ОКР «Производство, наладка, тестирование, установка программного обеспечения и поставка модулей систем управления на базе контроллера МК17.1 для многосекционных преобразователей частоты с вентильно-индукторными двигателями».
4. Договор № 07_Ц/11 от 01.12.2011 на выполнение ОКР «Изготовление, установка программного обеспечения и поставка микропроцессорных систем управления для мощных вентильно-индукторных приводов с двигателями 600, 1250 и 1600 кВт».
5. Договор №16_16/Э от 03.02.2017 на выполнение ОКР «Создание системы управления тягового электропривода автономного пропульсивного модуля и сопряжение системы управления с электрооборудованием».
6. Договор №17_16/Н от 22.02.2017 на выполнение ОКР «Разработка библиотеки имитационных моделей типовых электроприводов. Разработка драйвера CANopen и MODBUS».
7. Договор №08_17/Н от 21.06.2017 на выполнение составной части ОКР «Разработка референсного контроллера для управления силовыми преобразователями. Разработка программного обеспечения отладки в реальном времени (UniCON)».

Методы исследования. В работе использовались современные и классические методы научных исследований, в том числе, основанные на теоретической электротехнике, теории электромеханического преобразования энергии, теории автоматического управления. Применялось моделирование как на базе компьютерных имитационных моделей реального времени, так и с помощью пакетов прикладных программ. Экспериментальные исследования проводились на испытательных стендах ПАО «КАМАЗ», ЗАО «ПК ЗТЭО» и др., а также в процессе натурных испытаний транспортных средств по утвержденным методикам.

Достоверность полученных научных результатов определяется корректностью постановок задач, обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных методов, а также экспериментальным подтверждением адекватности предложенных моделей и основных теоретических выводов.

Научная новизна

1. Сформулирован метод оценки требований к тяговым электроприводам, позволяющий определить необходимую мощность и диапазон регулирования вверх от номинальной скорости с учетом особенностей конкретного типа тяговой электрической машины.
2. Для всех основных типов тяговых электроприводов получены предельные механические характеристики и определены эффективные области их применения с учетом необходимого диапазона регулирования скорости выше номинальной и эффективности использования силового преобразователя.
3. Разработаны алгоритмы управления потоками мощности в гибридной электротрансмиссии, обеспечивающие максимальную автономность устройств и энергетический баланс между источниками мощности и потребителями.
4. Разработаны алгоритмы самосенсорной идентификации положения ротора тяговых вентильно-индукторных электроприводов независимого возбуждения, основанные на инъекции напряжения в статорные обмотки и анализе отклика в обмотке возбуждения.
5. Разработаны алгоритмы идентификации скорости вращения тяговых электроприводов, обеспечивающие измерение скорости, синхронизированное с выполнением основных алгоритмов управления, что обеспечивает минимальную задержку измерения при максимальной точности.
6. Разработаны алгоритмы автоматической настройки параметров регуляторов и автоподстройки параметров наблюдателей состояния тяговых электроприводов в структурах векторного управления для компенсации девиации параметров при изменении температуры электрической машины.
7. Сформулирован общий подход к методам повышения надежности тягового электрооборудования путем превентивной идентификации неисправностей средствами системы управления.

Практическая значимость работы

1. Созданы универсальные модели для определения предельных механических характеристик тяговых электроприводов во всём диапазоне скоростей для основных типов электродвигателей (АД, СРМ, СДПМ, ВИД), позволяющие определить требуемую мощность электродвигателя и силового преобразователя, необходимую для достижения заданных показателей по мощности и диапазонам регулирования с постоянством момента и мощности.
2. Разработан алгоритм управления потоками мощности в гибридных и электрических трансмиссиях, основанный на анализе каждым устройством трансмиссии напряжения общего звена постоянного тока, обеспечивающий устойчивость работы всей энергосистемы и исключающий необходимость координации работы различных устройств по информационным сетям.
3. Разработан программный комплекс поддержки сетевого взаимодействия на базе протокола CANopen для сетей CAN и других физических интерфейсов, включающий в себя функции параметрирования, осциллографирования, сохранения журналов аварий, событий и осциллограмм режимов работы оборудования, обновление программного обеспечения устройств комплекта тягового электрооборудования.

4. Разработан подход к созданию и приведены примеры разработанного стендового оборудования для тестирования компонентов систем управления КТЭО.
5. Для отечественного микроконтроллера K1921BK01T разработан комплекс программно-аппаратных средств поддержки разработчиков, находящийся в открытом доступе и включающий в себя средства разработки ПО, отладки программ, драйверы сетевого взаимодействия по протоколу CANopen, примеры базовых структур систем управления всеми основными типами электродвигателей и схемотехнические решения для быстрого прототипирования электроприводов и систем управления, выполненных на базе K1921BK01T.

Внедрение и практическая реализация результатов

Результаты работы были внедрены в процессе выполнения НИР «Крымск» по созданию КТЭО гибридного транспортного средства с колёсной формулой 8x8 и индивидуальным электроприводом на каждое колесо, при создании электротрансмиссии многоосных колёсных машин большой грузоподъемности НТЦ ПАО «КАМАЗ», ОКР по созданию КТЭО полностью электрического автобуса «Волгабус» и автономного микроавтобуса «Martrëshka», создания КТЭО для карьерного самосвала БЕЛАЗ-90.

Системы самосенсорного управления внедрены в качестве аварийных систем, обеспечивающих функционирование оборудования в случае отказа датчика положения ротора.

Системы автоматического тестирования контроллеров системы управления применяются для аттестации всего выпускаемого оборудования ООО «НПФ «ВЕКТОР», поставляемого, в том числе, как в состав КТЭО различных транспортных средств, так и для других силовых преобразователей и источников питания, например, преобразователей собственных нужд вагонов метро.

Разработанные контроллеры на базе отечественного микроконтроллера K1921BK01T (НИИЭТ, гор. Воронеж) и программное обеспечение внедрены и испытаны в рамках работ с НТЦ ПАО «КАМАЗ» и в КТЭО карьерного самосвала БЕЛАЗ-90.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки требований к тяговым электроприводам, позволяющая определить необходимую мощность и диапазон регулирования вверх от номинальной скорости с учетом особенностей конкретного типа тяговой электрической машины и её работы совместно с силовым полупроводниковым преобразователем.
2. Способ управления потоками мощности в гибридных электротрансмиссиях, обеспечивающий максимальную автономность устройств и устойчивый энергетический баланс между источниками мощности и потребителями.
3. Метод самосенсорной идентификации положения ротора тяговых вентильно-индукторных электроприводов независимого возбуждения, основанный на инъекции напряжения в статорные обмотки и анализе отклика в обмотке возбуждения и обеспечивающий возможность управления во всём диапазоне скоростей без (или при отказе) датчика положения.
4. Алгоритм синхронизированного измерения скорости вращения тяговых электроприводов, обеспечивающий постоянную задержку измерения.

5. Способ автоматической подстройки параметров наблюдателей в системе векторного управления тягового электропривода для компенсации девиации параметров вследствие изменения температуры электрической машины.
6. Универсальные модели для построения предельных характеристик различных типов тяговых электроприводов и определения требований к силовым преобразователям.
7. Методика проектирования стендового оборудования для аттестации микроконтроллерных систем управления и методика диагностирования состояния электрооборудования средствами системы управления.
8. Программно-аппаратный комплекс разработки и прототипирования систем управления и электроприводов на базе отечественного микроконтроллера K1921BK01T, включающий в себя средства разработки ПО и отладки программ, драйверы CANopen, примеры базовых структур систем управления всеми основными типами электродвигателей, схемотехнику и трассировку печатных плат контроллера и силового преобразователя.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 33 научно-технических конференциях, в том числе:

1. V, VI, VII, VIII, IX Международные (XVI, XVII, XVIII, XIX, XX Всероссийские) конференции по автоматизированному электроприводу 2007, Санкт-Петербург; 2010, Тула; 2012, Иваново (3 доклада); 2014, Саранск (4 доклада).
2. Международные конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты 2008, 2010, 2012 гг.» (г. Алушта).
3. Научно-практические семинары, проводимые кафедрой АЭП НИУ «МЭИ», в том числе: «Методы и средства наладки электроприводов», 2014 г.; «Новые решения в электроприводе», 2016 г.; «Тяговые электроприводы», 2017 г.
4. EPE-PEMC 2004 // 11th International Power Electronics and Motion Control Conference, Riga, Latvia, 2004.
5. European Conference on Power Electronics and Applications EPE2014 ECE Europe, 26-28 August 2014.
6. 56-th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, Latvia on October 14, 2015 (3 доклада)
7. POWERENG 2015, Riga, Latvia, 10-11 May, 2015.
8. SIBCON 2015, Омск, Россия (2 доклада)
9. 6-th International conference on Internet Technologies & Applications (ITA15), Wrexham, Glyndwr University, 8-11 September 2015 (2 доклада)
10. 50th Universities Power Engineering Conference, Staffordshire University, UK, 1-4 September 2015 (2 доклада)
11. 51st International Universities Power Engineering Conference 2016, Coimbra, Portugal (2 доклада).
12. IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS), Пермь (2 доклада).
13. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), October 13-14, 2016 (5 докладов).
14. 42nd Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society October 24-27, 2016, Firenze (Florence), Italy (3 доклада).
15. 17th Mechatronika 2016, December 7 – 9, 2016, Prague.
16. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 2017, 1-3 June 2017, Sofia, Bulgaria.

17. 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania (2 доклада).
18. 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, USA.
19. IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, Riga, Latvia, 2017 (4 доклада).
20. 2017 Internet Technologies and Applications (ITA), Wrexham, Glyndwr University, UK.
21. 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), Warsaw, Poland.
22. 52nd International Universities Power Engineering Conference, UPEC'2018, Crete, Greece (2 доклада).
23. IECON 2017 – 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China (2 доклада).
24. 2017 International Symposium on Power Electronics, Novi Sad, Serbia, (2 доклада).
25. International Workshop on Electric Drives, 2018, Moscow, Russia (4 доклада).
26. 17th international Ural Conference on AC Electric Drives, Ekaterinburg, Russia.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 101 научная работа, в том числе, 2 учебника, 60 статей в журналах и материалах конференций, рекомендованных ВАК РФ или приравненных к ним, из них 50 статей в журналах и материалах конференций, индексируемых в базе научного цитирования Scopus и Web of Science, получен 1 патент РФ на полезную модель.

Структура и объём работы. Диссертация изложена на 445 страницах машинописного текста, содержит введение, шесть глав, заключение, список используемых сокращений, список литературы из 194 именованных, 5 приложений на 16 листах, 7 актов внедрения и иллюстрируется 185 рисунками.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность решаемой в диссертации проблемы, сформулированы цель и связанные с ее достижением научные и технические задачи. Сформулирована научная новизна работы и основные положения диссертации, выносимые на защиту. Приведены сведения о практической реализации полученных результатов.

В первой главе выполнен анализ требований, предъявляемых к тяговым электроприводам, проведен анализ предельных механических характеристик различных типов электроприводов в зоне ослабления поля и даны рекомендации по выбору мощности тяговых приводов.

Тяговый электропривод является системой, которая в большинстве случаев работает в условиях ограниченной подводимой мощности. Это ограничение по току контактного провода, ограничение по току аккумуляторной батареи, ограничение по мощности дизель-генераторной установки и т.д. Данное обстоятельство вынуждает разработчиков тяговых электроприводов обеспечивать работу электропривода в двух зонах регулирования: вниз и вверх от номинальной скорости. Регулирование вниз обеспечивается в режиме постоянства момента, регулирование вверх — в режиме постоянства мощности.

К тяговому электроприводу и всему комплексу тягового электрооборудования, устанавливаемому на конкретное шасси, представляющее собой транспортное средство (ТС), предъявляются различные требования, из которых можно выделить следующие основные показатели:

- максимальная скорость движения ТС;
- максимальный преодолеваемый уклон;
- продолжительно преодолеваемый уклон;
- время разгона/торможения до/с заданной скорости движения.

Кроме того, существует масса второстепенных требований, часть из которых зачастую не могут быть объяснены с позиции здравого смысла, например, значение постоянной мощности, развиваемой тяговым электроприводом во всём диапазоне скоростей. Как показано далее, это требование существенно влияет на выбор установленной мощности тягового электрооборудования и может приводить к необоснованному завышению показателей относительно необходимых.

Приведены формулы для расчета требуемой мощности при движении на максимальной скорости, расчета тягового усилия для преодоления максимального уклона, продолжительно преодолеваемого уклона. Приведены примеры расчета тяговых характеристик дорожной машины на примере BMW i3 и карьерного самосвала БЕЛАЗ-90. Показано, что в зависимости от назначения гибридного транспортного средства требования к тяговой характеристике оказываются существенно различными.

Произведен анализ механических характеристик следующих типов тяговых электроприводов из условия ограничения установленной мощности силового преобразователя:

- асинхронного электропривода;
- электропривода с синхронным двигателем с постоянными магнитами;
- электропривода с синхронным реактивным электродвигателем;
- вентильно-индукторного электропривода;
- вентильно-индукторного электропривода независимого возбуждения.

Для каждого из электроприводов создана модель для получения предельной механической характеристики во всём диапазоне скоростей. Пример модели для асинхронного электропривода представлен на рис. 2.

Показано, что для обеспечения работы тягового электропривода в режиме постоянства мощности в широком диапазоне необходимо завышение установленной мощности электродвигателя и силового преобразователя, как показано на рис. 3. Его предлагается обозначить термином коэффициент использования инвертора, который равен отношению мощности на валу к полной мощности.

Результирующие характеристики для всех типов электродвигателей представлены на рис. 4 (мощности в функции скорости). По полученным характеристикам можно сделать выводы о применимости каждого из типов.

Наиболее предпочтительным с точки зрения использования инвертора является СДПМ (коэффициент использования инвертора 0,71 – 0,93). Этот привод изначально дороже других из-за высокой стоимости постоянных магнитов. При этом сохраняется опасность изменения свойств магнитов во времени (размагничивание) или от воздействия высоких токов. В процессе нагрева электродвигателя сила постоянных магнитов также снижается, и чем выше рабочая температура, тем быстрее происходит деградация. Разброс параметров магнитов не позволяет выпускать одинаковые по мощности машины, и важно производить отбор одинаковых маг-

нитов для одной конкретной машины, иначе двигатель будет иметь разную амплитуду ЭДС на разных электрических полюсах, а также для клинообразного расположения магнитов возможно появление в форме ЭДС четных гармоник.

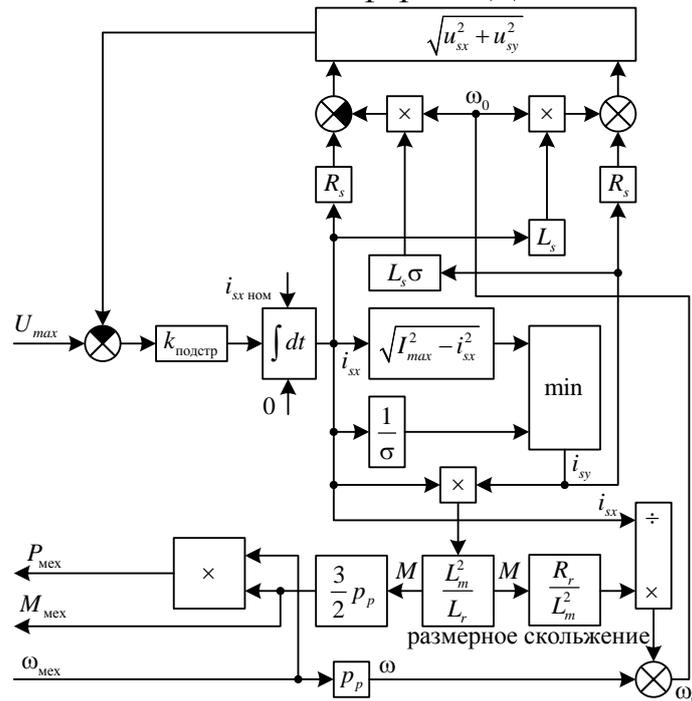


Рис. 2. Модель для определения предельной механической характеристики АД в режиме векторного управления при ограничении тока и напряжения

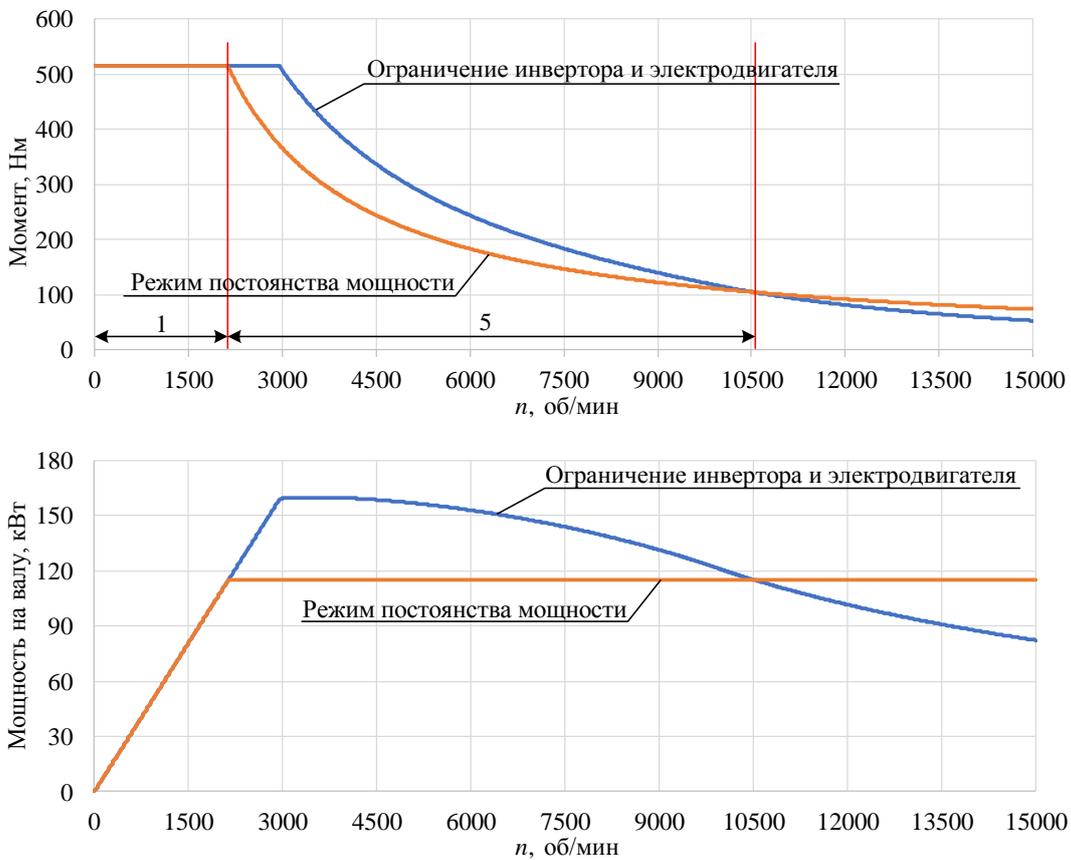


Рис. 3. Неиспользование электродвигателя и силового преобразователя для АД с диапазоном регулирования в зоне ослабления поля 5:1

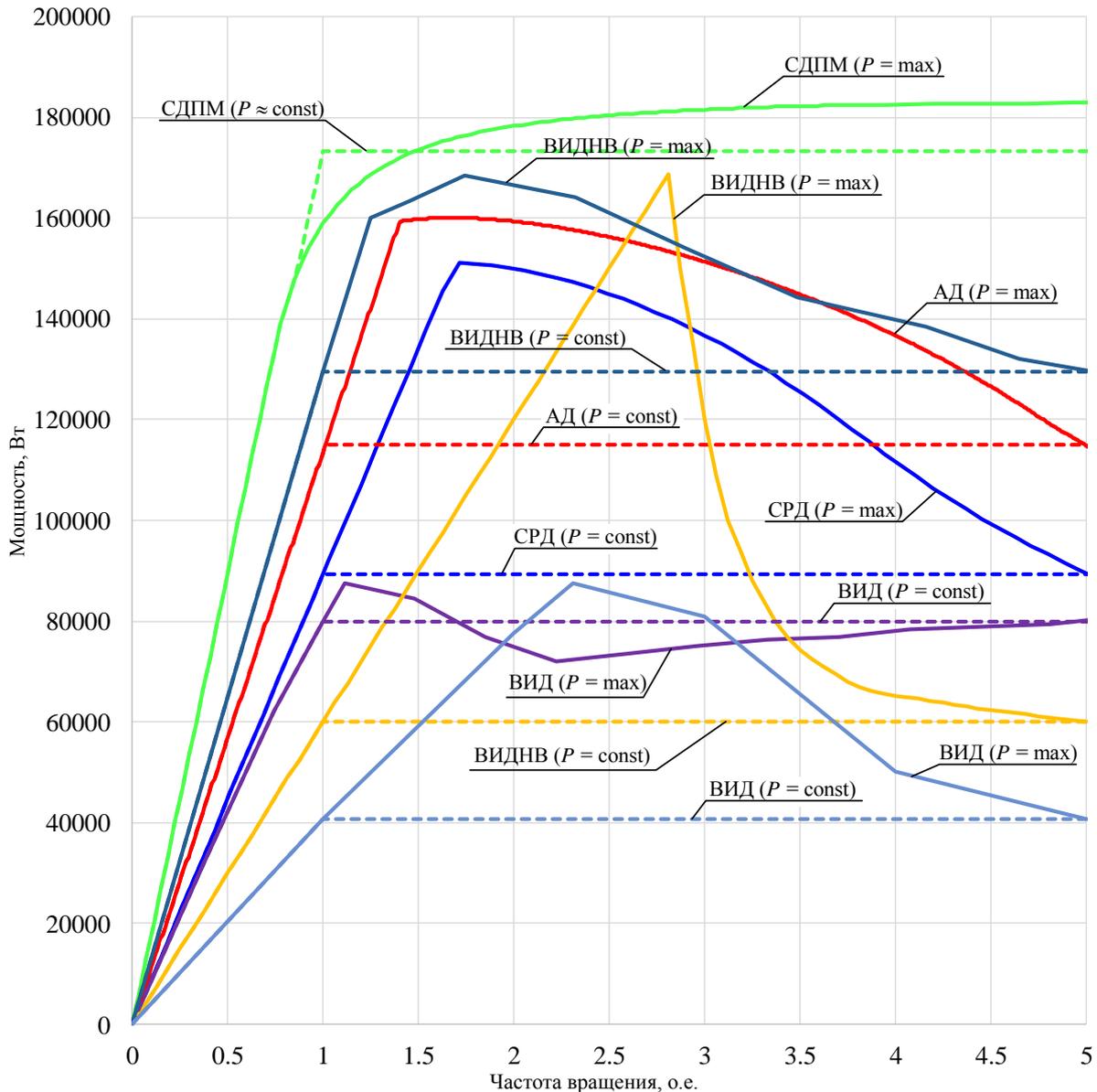


Рис. 4. Сопоставление мощностей различных типов электродвигателей при питании от одинакового инвертора

Аварийные режимы работы являются весьма опасными. Так, отключение инвертора на максимальной скорости вызывает неконтролируемое выпрямление на ЗПТ. При подключенной на ЗПТ аккумуляторной батарее проблем с силовой электроникой можно избежать, однако при этом транспортное средство начинает экстренное неконтролируемое торможение, что может быть неожиданно не только для водителя, но и для других участников движения. Решить данную проблему можно замыкая обмотки в одной точке каким-либо способом (включение всех нижних или верхних ключей инвертора, применение системы защиты от перенапряжений на базе выпрямителя и тиристора. В этом режиме машина находится в динамическом торможении, однако большая индуктивность фазы ограничит ток на приблизительно номинальном уровне, а поскольку момент машины пропорционален потерям и обратно пропорционален скорости, то при номинальных потерях он не будет сколько-нибудь значимым вплоть до почти полной остановки. Таким образом, режим работы будет близким к выбегу.

Асинхронный двигатель, являвшийся самым массовым в тяге, в последние десятилетия постепенно уступает свои позиции СДПМ. Последние решения, призванные повысить его эффективность, были реализованы в автомобилях Tesla, где беличья клетка ротора выполнена из меди. Двигатель имеет хорошие характеристики, однако проблема отведения тепла от ротора накладывает ограничения на габаритные размеры машины и её размещение. Недостатком асинхронного двигателя для ТС с широким диапазоном ослабления поля надо считать существенное уменьшение момента из-за влияния индуктивности рассеяния на высоких скоростях. Здесь необходимо делать существенный запас по мощностям инвертора и электродвигателя, так как коэффициент использования инвертора около 0,61 для диапазона 5:1. Следует также отметить, что до сих пор не созданы и, скорее всего, не будут созданы системы самосенсорного управления для АД. Хотя некоторые авторы рассматривают возможность проектирования специального АД для самосенсорного управления. Таким образом, АД остается единственной электрической машиной, для которой не создана система бездатчикового управления, функционирующая во всем диапазоне скоростей, включая нулевые скорости.

Применение синхронной реактивной машины в тяге ограничено, так как её моментная характеристика быстро падает на скоростях выше номинальной, что дает коэффициент использования инвертора — 0,45. Однако электродвигатель может применяться в ТС, работающих в узком диапазоне скоростей.

Классический ВИД активно исследуется учеными с момента появления IGBT, однако его применение весьма ограничено. Много проблем возникает с повышенными пульсациями момента, которые можно эффективно контролировать в зоне постоянства момента, однако ни в режиме прерывистых токов, ни в режиме непрерывных, это невозможно делать при скоростях выше номинала. Частично данная проблема решается увеличением числа фаз электродвигателя, однако это приводит к неизбежному росту стоимости силового преобразователя, который и в трехфазном варианте обходится дороже по комплектации, чем решения для СДПМ или АД. Пульсации момента и особенности создания момента (сопутствующие радиальные усилия) приводят к повышенным нагрузкам на подшипники, что может существенно уменьшать их срок службы. Отдельно следует отметить, что в большинстве случаев рассматривается режим работы ВИД с прерывистым током, который не позволяет получить режим постоянства мощности в зоне «ослабления поля». Выше номинальной скорости мощность падает обратно пропорционально скорости, что приводит к резкому уменьшению тягового момента. Обеспечение заданной тяговой характеристики в таком режиме требует переразмерить электрическую машину и силовой преобразователь. Для диапазона 5:1 эффективность использования элементов силового преобразователя составила лишь 0,22, в то время как для режима непрерывного тока она составляет 0,43.

ВИДНВ — относительно новый тип привода, используемый в тяге, имеет свою нишу, так как позволяет при не самом лучшем использовании силового преобразователя иметь небольшие габариты. В габаритах стандартного АД он позволяет получить характеристики несколько лучшие, чем у АД. На рис. 4 представлены характеристики сразу двух машин, которые сильно отличаются коэффициентом использования инвертора. Для двигателя НИР «Крымск» это

33%, а для проекта двигателя поезда метро — 69%. Пульсации момента практически отсутствуют, и электродвигатель управляется системой векторного управления с качественным контролем развиваемого момента.

Таким образом, **в первой главе** для тяговых электроприводов разного типа были разработаны методы построения предельных механических характеристик для анализа возможности применения каждого типа электропривода при заданных параметрах тяговой характеристики, таких как максимальный преодолеваемый уклон дороги и максимальная скорость. Показано, что задание постоянства мощности в качестве обязательного параметра во всём диапазоне скоростей ведет к необходимости завышать установленную мощность силового преобразователя и тягового электродвигателя. Рекомендуется при проектировании тяговых электроприводов отказаться от требования обеспечения постоянства мощности в пользу параметров: максимальная скорость, максимальный уклон и время разгона до определенной скорости. Данные критерии в достаточной степени определяют динамические свойства проектируемого ТС и позволяют существенно снизить стоимость и массу тягового электропривода за счет снижения требований по моменту в области максимальных скоростей, где ТС работает крайне редко. Например, для асинхронного тягового электропривода это позволит снизить установленную мощность на 10–50% в зависимости от области применения.

Во второй главе рассмотрена модульная структура гибридной электрической трансмиссии последовательного типа и базовые принципы энергетического баланса и информационного сетевого взаимодействия её элементов.

Тяговый электропривод является лишь главной, но не единственной составляющей гибридной электротрансмиссии. Требуется слаженная работа всех подсистем, включая управление ДВС и генератором, контроль тяговых усилий на колёсах, совместная работа систем электрического и механического торможения и т.д. Эти вопросы требуют организации как информационного, так и энергетического взаимодействия, рассмотренного во второй главе.

Гибридные ТС последовательного типа строятся вокруг общего звена постоянного тока (ЗПТ). В общем случае, с целью увеличения надежности и живучести ТС трансмиссия может содержать несколько независимых звеньев постоянного тока, питаемых от разных генерирующих подсистем и питающих разных потребителей. Генерирование энергии осуществляется от нереверсивного источника питания. Это может быть дизель-генераторная установка или топливный элемент. Тяговые электроприводы и вспомогательное оборудование питаются от ЗПТ. К ЗПТ также подключаются накопители энергии, такие как аккумуляторные батареи и суперконденсаторы. Вместе все элементы, входящие в электротрансмиссию, называются комплектным тяговым электрооборудованием (КТЭО).

Связь между элементами КТЭО трансмиссии осуществляется различными способами. Как правило, имеется более одной локальной промышленной информационной сети для повышения надежности и канал аварийного управления. Пример структуры КТЭО НИР «Крымск» представлен на рис. 5.

При проектировании структур гибридных электрических трансмиссий в первую очередь удовлетворялись следующие основные требования:

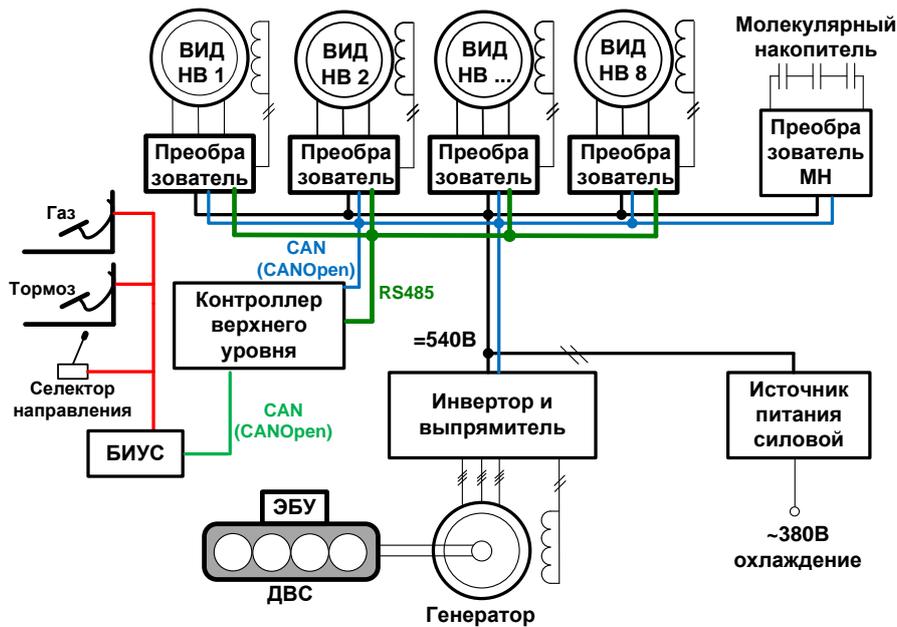


Рис. 5. Пример структуры электротрансмиссии

- Система управления каждым конкретным устройством должна быть максимально независимой и способной функционировать в условиях управления по резервным каналам связи без существенного снижения характеристик трансмиссии в целом.
- Система должна самостоятельно реализовывать функции энергетического баланса между источниками и потребителями электроэнергии и исключать развитие аварийных ситуаций, не допуская избыточного генерирования в отсутствии потребителей в ЗПТ.
- Каналы связи должны дублироваться как минимум на 100%. При этом их пропускная способность и решаемые задачи могут быть различными, но базовые функции распределения заданий на колеса должны выполняться.

Работа множества устройств состава гибридной трансмиссии требует выполнения энергетического баланса между генерируемой мощностью и потребляемой. Задача балансировки мощности может решаться средствами контроллера верхнего уровня, однако в этом случае будет необходимо реализовать высокоскоростной интерфейс для передачи заданий на каждое из устройств. Чтобы увеличить надежность работы и не загружать информационную сеть дополнительными сообщениями о балансировке мощности устройств, разработан алгоритм, который функционирует, основываясь исключительно на уровне напряжения ЗПТ трансмиссии. Данный алгоритм может быть адаптирован для различных конфигураций гибридной трансмиссии.

На рис. 6 представлен алгоритм автоматической балансировки мощности для трансмиссии с суперконденсаторным накопителем (молекулярный накопитель) и тормозными резисторами. В зависимости от текущего напряжения ЗПТ каждое из устройств ограничивает задание. Такой алгоритм был реализован на всех разработанных гибридных трансмиссиях и показал отличную эффективность и простоту настройки.

Структура рис. 7 представляет собой пример реализации одной из гибридных трансмиссий и содержит три независимых канала связи:

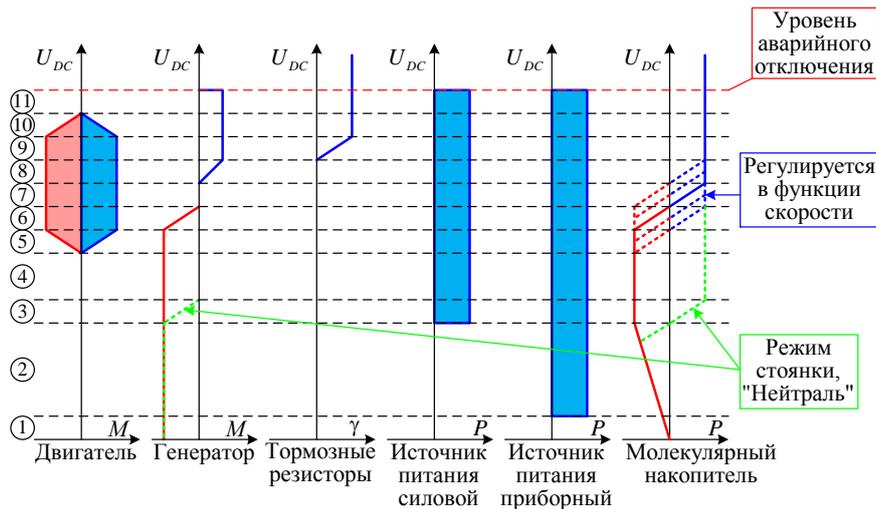


Рис. 6. Пример реализация алгоритма автоматической балансировки мощности для трансмиссии НИР «Крымск»

- Высокоскоростной RS-485 для задания моментов на колесах и получения информации о состоянии тяговых электроприводов.
- CAN-сеть с протоколом CANopen, используемая для настройки устройств, коммуникации с «медленными» устройствами, такими как ПСН и т.д., не требующих быстрого обмена информацией.
- RS-485 с протоколом MODBUS RTU для аварийного обмена информацией в случае повреждения CAN-сети.

Показано, что полностью реализовать обмен с использованием только одной сети CAN невозможно по причине низкой скорости передачи данных, недостаточной для работ систем помощи водителю, особенно в многоколёсных транспортных средствах, так и с точки зрения надёжности и резервирования.

Предложено для многоколесной электротрансмиссии быстрым каналом связи охватить ПСТЭД для оперативного задания момента двигателей и получения обратной связи по скорости, чтобы обеспечить работу систем помощи водителю, таких как защита от блокировки колес — антиблокировочная система (АБС) и проскальзывания колес — противобуксовочная система (ПБС). Показано, что в качестве быстрого канала связи для контроля и управления тяговых электроприводов можно использовать интерфейс RS-485 со скоростью 1 Мбод с коммуникационным протоколом управления движением.

Так как высокоскоростной интерфейс управляет только тяговой подсистемой рис. 7, то для резервирования управления по вспомогательным преобразователям требуется реализация третьего интерфейса. Им может быть вторая линия CAN с протоколом CANopen. Первые реализации гибридных электрических трансмиссий выполнялись на базе микроконтроллеров с одним CAN-модулем, поэтому в трансмиссии рис. 7 в качестве третьего резервного интерфейса используется RS-485 с протоколом MODBUS RTU и скоростью обмена 38,4 кбод.

Управление всеми устройствами осуществляет контроллер верхнего уровня (КВУ). При его отказе в работу вступает контроллер аварийного управления (КАУ), который по функциям его дублирует и имеет панель аварийного управления, чтобы взаимодействовать с элементами трансмиссии при отказе борто-

вой информационно-управляющей системы (БИУС), связь которой осуществляется по интерфейсу J1939. Управление ДВС осуществляется от контроллера ДВС (КДВС) по интерфейсу J1939, который также получает задание от КВУ. Функция КДВС — регулировать частоту вращения ДВС с целью обеспечения оптимальной рабочей точки при текущей потребляемой трансмиссией мощности. КВУ, КАУ и КДВС функционально объединены в одном блоке БУ КТЭО.

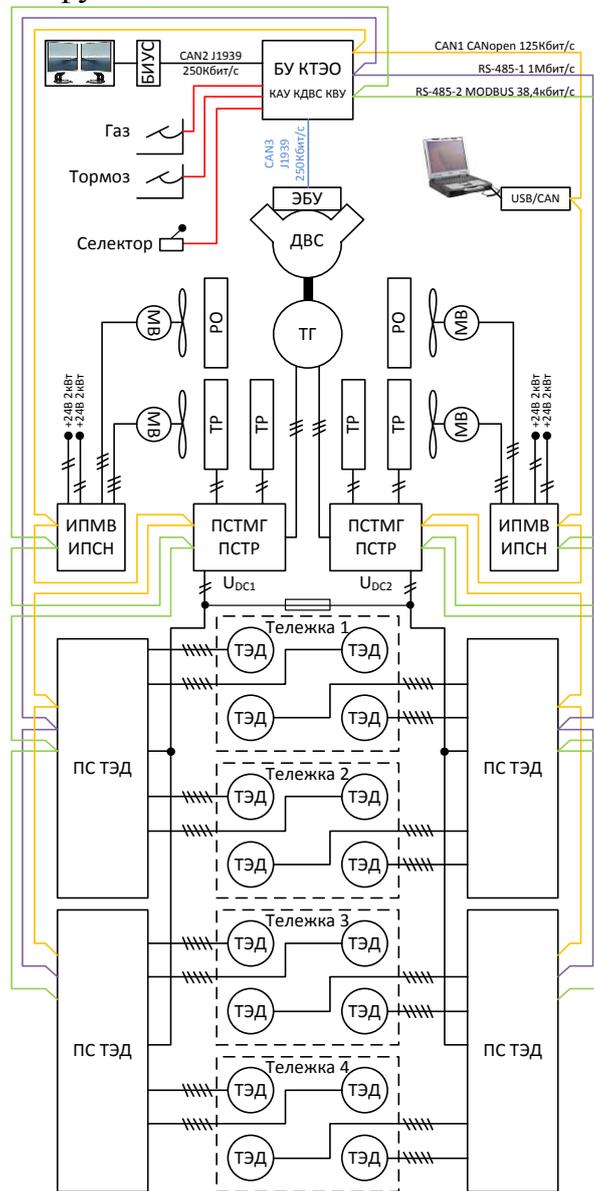


Рис. 7. Пример структуры трансмиссии (ТЭД — тяговый электродвигатель, ПС ТЭД — преобразователь силовой тягового электродвигателя, ИПМВ — источник питания мотор-вентиляторов, ИПСН — источник питания собственных нужд, ПСТР — преобразователь силовой тормозных резисторов, ПСТМГ — преобразователь силовой тягового мотор-генератора, ТР — тормозные резисторы, РО — радиатор охлаждения, МВ — мотор-вентиляторы, ЭБУ — электронный блок управления, БИУС — бортовая информационная управляющая система, БУ КТЭО — блок управления комплектом тягового электрооборудования)

Для контроллера верхнего уровня разработан алгоритм формирования заданий моментов на тяговые двигатели, механические тормоза транспортного средства и предупредения для ДВС.

Суммируя результаты **второй главы**, следует отметить, что для гибридных транспортных средств была произведена классификация состава электрооборудования и представлены варианты их функциональных схем. Был разработан и реализован алгоритм энергетического баланса в гибридной трансмиссии с общим промежуточным звеном постоянного тока, обеспечивающий автономную работу всех устройств трансмиссии и корректировку их производительности в зависимости от напряжения звена постоянного тока.

Обоснован необходимый набор коммуникационных сетей для организации управления и наладки оборудования трансмиссии в нормальных и аварийных режимах, обеспечивающий трехкратное резервирование основных функций.

Разработаны и реализованы алгоритмы систем помощи водителю, такие как АБС, ПБС, система распределения моментов и тормозных усилий для многоколесных транспортных средств с приводом на каждое колесо.

В третьей главе рассмотрены вопросы измерения скорости и положения в тяговых электроприводах с использованием основных видов датчиков положения, а для вентильно-индукторного электродвигателя и для вентильно-индукторного электродвигателя независимого возбуждения разработаны самосенсорные алгоритмы идентификации положения ротора.

Рассмотрены датчики на эффекте Холла и реализация измерения скорости по сигналам этого датчика, реализован режим экстраполяции положения, обеспечивающий непрерывную идентификацию углового положения.

Для инкрементального датчика положения ротора рассмотрены основные способы измерения скорости и предложен синхронизированный метод постоянного времени измерения, который производит измерения синхронно с работой системы управления, обеспечивая минимальную задержку в канале измерения при вдвое более высокой точности.

Для инкрементальных датчиков положения с синусно-косинусным выходом реализован измеритель скорости для низких частот вращения, основанный на применении схемы с автоподстройкой частоты. Для исключения постоянной составляющей из сигналов датчиков предложен фильтр, пропускающий высокие частоты в угловой области.

Один из главных недостатков тяговых электроприводов любого типа — это наличие датчика положения ротора, который необходим для обеспечения работы системы векторного управления, обеспечивающей регулирование момента и скорости двигателя, с нулевых скоростей до максимальных. Следует отметить, что наличие датчика положения ротора в тяговых электроприводах имеет ряд нежелательных эффектов:

- увеличение цены электропривода за счет цены датчика, его монтажа, прокладки проводов;
- снижение надежности тягового электропривода в целом из-за зависимости надежности системы от надежности датчика положения;
- увеличение массогабаритных параметров электрических машин из-за необходимости располагать датчик вовне или внутри электрической машины;
- возникают требования на пыле- и влагозащищенность датчиковых узлов электрической машины;

- имеются ограничения по теплу для чувствительных элементов датчиков положения, что накладывает ограничения на тепловой режим работы машины и ведет к занижению удельной мощности.

Большинство традиционных бездатчиковых систем управления работают по принципу выделения противо-ЭДС электродвигателя. С уменьшением скорости погрешность определения противо-ЭДС растет, так как сама ЭДС становится меньше, а относительная погрешность воспроизведения напряжения инвертором возрастает. Частично неидеальности инвертора можно скомпенсировать, проведя компенсацию «мертвого» времени и падения напряжения в ключах, но на практике диапазон бездатчиковой системы управления по скорости не превышает 50:1. Для тяговых электроприводов предъявляются также требования по реализации максимального момента на остановленном ТС и удержанию ТС в неподвижном состоянии на уклоне, что в системах, выделяющих противо-ЭДС, нереализуемо.

Вместе с тем, можно восстанавливать угловое положение вала ротора путем анализа магнитной анизотропии машины по форме токов и напряжений. Для машин с сильной анизотропией, таких как СДПМ или ВИД, это относительно простая задача. Для АД, магнитная анизотропия которого не превышает нескольких процентов и имеет высокий коэффициент электромеханической редукции, исследования показали невозможность создания таких систем в ближайшее время. В ВИДНВ имеется дополнительный канал измерения — обмотка возбуждения, и электрическая машина может использоваться в качестве вращающегося трансформатора. Все эти системы названы самосенсорными, чтобы отличать их от бездатчиковых способов, работающих по принципу выделения противо-ЭДС.

Самосенсорные системы управления хорошо применимы для специальных электроприводов с известными параметрами электродвигателя и карт анизотропии. В рамках диссертации были разработаны решения в области самосенсорного управления для ВИД и ВИДНВ. В автореферате рассмотрены решения только для ВИДНВ.

ВИДНВ выполняются в 4-х основных модификациях с точки зрения конструктивного исполнения, и наилучшие массогабаритные характеристики показывает ВИДНВ с опущенной обмоткой, конструкция которой представлена на рис. 8. Внешний вид ротора ВИДНВ (ДВИ-37 НИР «Крымск») представлен на рис. 9.

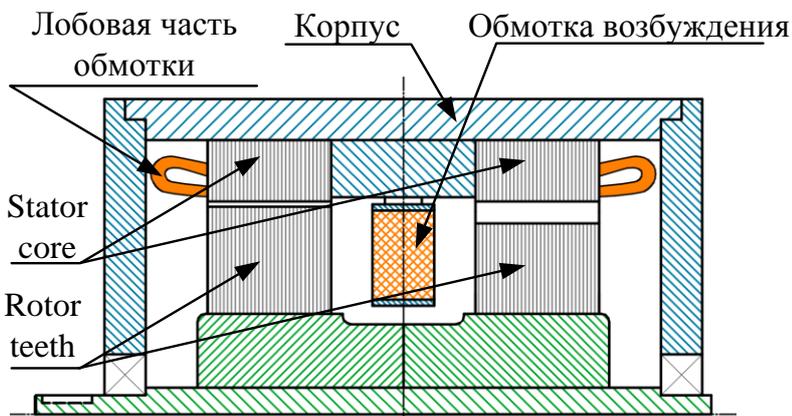


Рис. 8. Различные исполнения ВИДНВ

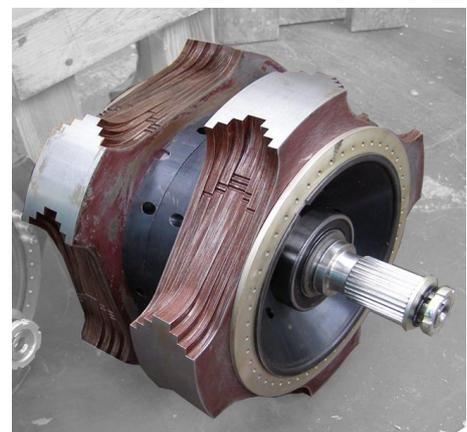


Рис. 9. Ротор ВИДНВ в сборе

Математическое описание ВИДНВ соответствует описанию классической синхронной машины в части уравнений равновесия и потокосцеплений:

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= i_{sd} R_s + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \psi_{sq} \omega_{эл}, \\ u_{sq} &= i_{sq} R_s + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \psi_{sd} \omega_{эл}, \\ u_f &= i_f R_f + \frac{d\psi_f}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sd} &= L_{sd} \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_f, \\ \psi_{sq} &= L_{sq} \cdot i_{sq}, \\ \psi_f &= L_m \cdot i_{sd} + L_f \cdot i_f, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где L_{sd} — индуктивность статора в направлении продольной оси, L_{sq} — индуктивность статора в направлении поперечной оси, L_f — индуктивность обмотки возбуждения, L_m — взаимная индуктивность между эквивалентной обмоткой продольной оси и обмоткой возбуждения, R_s — сопротивление фазной обмотки, R_f — сопротивление обмотки возбуждения, u_{sd} , u_{sq} и u_f — фазные напряжения в направлениях продольной и поперечной оси и напряжение обмотки возбуждения, i_{sd} , i_{sq} и i_f — соответствующие токи, ψ_{sd} , ψ_{sq} и ψ_f — потокосцепления. Уравнение момента:

$$M = \frac{3}{2} p_p \left(L_m i_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq} \right). \quad (3)$$

Следует отметить, что с целью оптимизации габаритов ВИДНВ разработчики используют глубокое насыщение зубцовой зоны, что вызывает существенные нелинейности всех индуктивностей. В таком варианте характеристик двигателя практически не содержит зоны ослабления поля, однако номинальная мощность двигателя может превышать мощность АД аналогичной массы и объема.

ВИДНВ имеет большую продольную индуктивность, чем поперечную, поэтому инжекция высокочастотного сигнала в статорную обмотку приведет к возникновению отклика в форме токов статора, который будет определяться угловым положением ротора. Оценка углового положения требует, как минимум одного периода инжекции, поэтому данный метод реализуем только для низких скоростей. На высоких скоростях изменение угла за период инжекции может оказаться значительным, поэтому при увеличении скорости система управления переключается на метод оценки положения по противо-ЭДС. Как и для классического ВИД, это переключение должно быть произведено как можно раньше, так как любая инжекция негативно влияет на характеристики электропривода из-за некоторого увеличения тока, акустического шума и пульсаций момента.

Самосенсорные методы делятся на множество подклассов, таких как инжекция тока или инжекция напряжения. Инжекция напряжения, как наиболее часто используемая, в свою очередь делится на инжекцию пульсирующего сигнала и инжекцию вращающегося сигнала. Частота инжектируемого сигнала в большинстве случаев лежит в пределах от 300 Гц до 1 кГц или использует перебор состояний инвертора в процессе ШИМ и измеряет отклик в токе на каждое из состояний.

На рис. 10 представлена структура системы управления для исследования обоих методов самосенсорной идентификации — наблюдатель по отклику в токе статора и наблюдатель по отклику в токе возбуждения. Структура не имеет обратной связи по положению и позволяет реализовывать любой вращающийся вектор тока вместе с инжектированием сигнала. Три опыта были проведены последовательно с различными условиями. В первом случае задание тока статора было равным нулю, чтобы исследовать возможность определения положения на холостом ходу. Эксперимент был проведен для трех различных положений вала двигателя — 300, 240 и 60 электрических градусов и частоте инжекции 250 Гц. Отклик в токе на высокочастотную инжекцию показан на рис. 11. Разница в переменной составляющей тока показывает, что индуктивность меняется более чем в три раза, что может быть использовано для определения положения ротора.

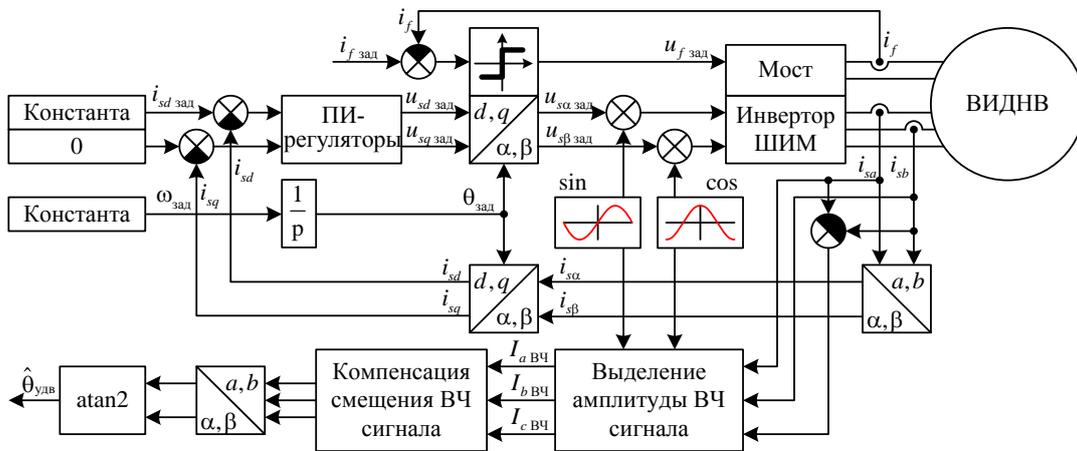


Рис. 10. Структура системы управления для тестирования алгоритмов идентификации положения

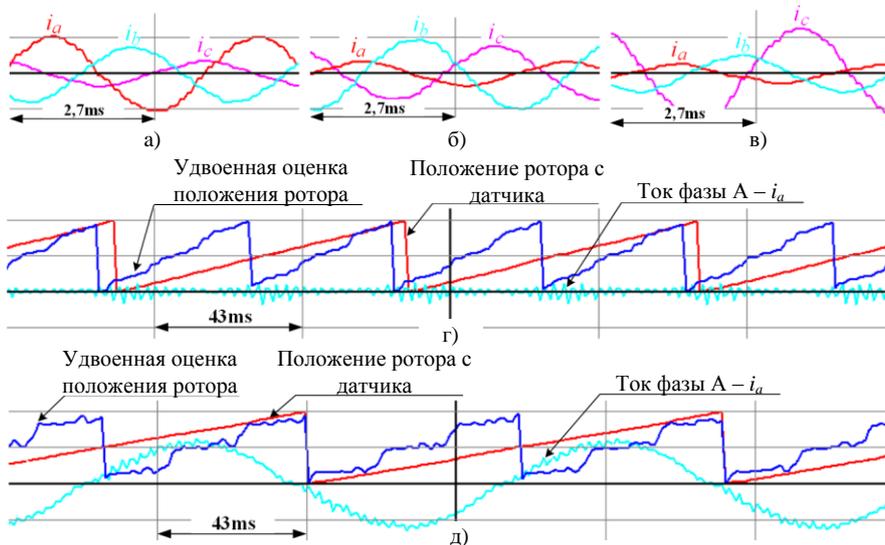


Рис. 11. Оценка положения наблюдателем по отклику в токе статора: а — токи трех фаз при положении 300°; б — 240°; в — 60°; г — оценка угла при нулевом токе статора; д — оценка угла при токе статора 60 А

Точность рассмотренного метода по отклику в токе статора страдает от насыщения машины, и при большом фазном токе оценка положения меняется ступеньками. Но хотя точность уменьшилась на столько, что теперь различимо

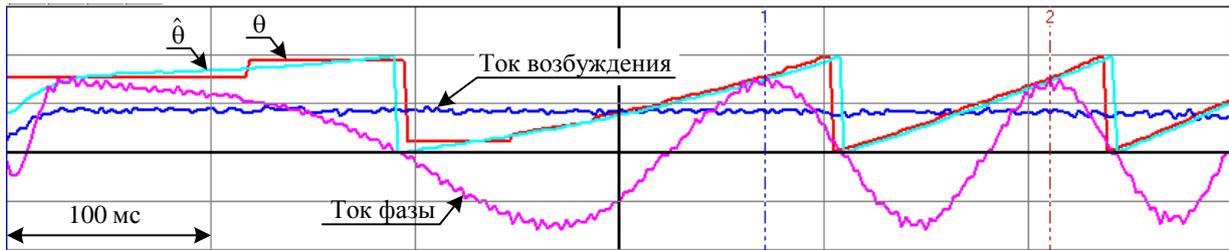


Рис. 14. Определение углового положения ротора при пуске с наблюдателем по отклику в токе возбуждения (ток фазы — 100 А в клетке; ток возбуждения — 5 А в клетке, углы — 180° в клетке)

Таким образом, **в рамках третьей главы** был разработан комплекс алгоритмов идентификации скорости и положения для основных типов датчиков, применяемых в тяговых электроприводах, и реализована самосенсорная идентификация положения.

Для инкрементальных датчиков положения предложен метод синхронизированного измерения скорости, обеспечивающий минимальную и постоянную задержку, равную половине времени измерения скорости, и обеспечивающий в два раза более высокие показатели по сравнению с известными методами.

Для синусно-косинусных инкрементальных датчиков положения разработан метод фильтрации постоянной составляющей сигналов в угловой области, не требующий перенастройки в зависимости от угловой частоты вращения.

Разработаны алгоритмы самосенсорной идентификации положения, обеспечивающие надежное функционирование тяговых электроприводов в случае отказа датчика положения ротора. Для вентильно-индукторных электроприводов с независимым возбуждением разработана и реализована система самосенсорного управления с наблюдателем по отклику в токе возбуждения, обеспечивающая идентификацию положения во всём диапазоне моментов, реализуемых тяговым электроприводом, что позволяет создавать тяговые электроприводы, изначально не имеющие датчика положения ротора в своей конструкции.

В четвертой главе рассмотрен разработанный комплекс для разработки и отладки распределенных цифровых систем управления. Разработка и отладка распределенных микроконтроллерных систем управления, какой является любая гибридная электрическая трансмиссия, требует эффективных методов настройки параметров, осциллографирования, обновления ПО. Имеющиеся решения производителей микроконтроллеров, такие как JTAG-эмуляторы, даже при наличии в них поддержки отладки реального времени не позволяют оперативно подключаться к отлаживаемым устройствам, не обеспечивают безопасной отладки, так как в условиях помех от силовой части микроконтроллер может дать сбой при работе по отладочному интерфейсу, что в свою очередь может привести к отказу силовой части привода.

Были созданы собственные средства отладки, работающие по последовательным каналам связи, обеспечивающие удобный пользовательский интерфейс не только для программиста, но и наладчика электротехнического комплекса. В качестве базового интерфейса для отладки был выбран CAN с протоколом CANopen, и вокруг него появилось большое число дополнительных сервисов, обеспечивающих необходимые функции разработки и отладки цифровых систем управления.

Были определены задачи последовательного интерфейса связи:

- управление устройствами;
- диагностика устройств;
- настройка параметров и режимов работы;
- отладка алгоритмов работы и цифровое осциллографирование;
- обновление программного обеспечения.

При разработке драйвера CANopen были учтены недостатки стандартного протокола. Адаптация проводилась за счет включения в драйвер надстроек и не ухудшает совместимость с другими устройствами. Решены следующие задачи:

- Реализована поддержка представления данных в относительных единицах. Каждому параметру в относительных единицах ставится в соответствие масштабирующий коэффициент, необходимый для преобразования из относительных величин в абсолютные. Каждый параметр имеет размерность и префикс (к, М, Г, п, н, мк, м) для представления больших и малых величин.
- Разработан механизм определения перечня параметров устройства, что позволяет подключаться к устройствам CAN-сети и производить просмотр и настройку параметров, не имея файла описания словаря устройства. Это позволяет подключать пульта управления, универсальные для всех устройств сети.
- Реализованы режимы автоматического включения устройства в работу со слежением за наличием в сети обязательных устройств.

Для отладки процессов в системе удобно использовать цифровые средства осциллографирования. Современные микроконтроллеры имеют достаточный объем оперативной памяти, чтобы не только хранить значения всех переменных системы управления, но и запоминать переходные процессы в системе.

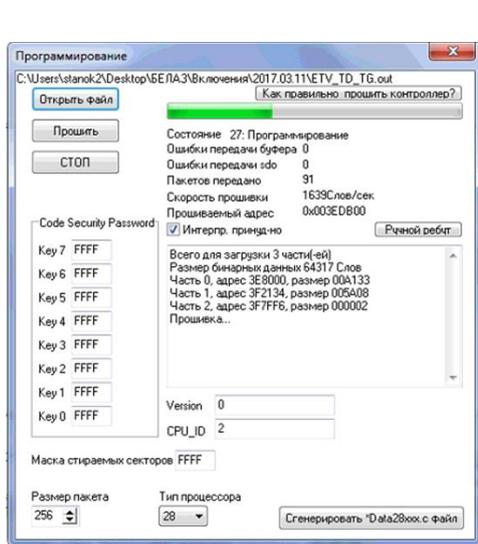
Был разработан и поддержан со стороны верхнего уровня (компьютерной программы UniCON) цифровой осциллограф на 4 канала и 256 выборок по каждому из них. Запуск осциллографирования осуществляется по событиям в системе, таким как запуск, авария, или другое произвольное событие. Предельная частота осциллографирования ограничена частотой выборки АЦП и может достигать 80 кГц и более. Со стороны верхнего уровня загрузка и отображение осциллограмм осуществляется специализированной программой UniCON, интерфейс которой представлен на рис. 15.

При обновлении программного обеспечения не всегда можно использовать отладочный интерфейс JTAG из-за труднодоступности МК по конструктивным причинам. Например, транспортное исполнение обычно подразумевает высокую степень IP. Оборудование может быть расположено в труднодоступных местах, а вывод в доступную область интерфейса для программирования JTAG невозможен из-за ограничения на длину проводов. В таком случае для обновления ПО логично применять один из интерфейсов сетевого обмена информацией. Для нескольких семейств микроконтроллеров была разработана система обновления ПО по CAN-интерфейсу, обеспечивающая шифрование передаваемых данных. Система позволяет производить перепрограммирование устройств без вскрытия и физического доступа к интерфейсу JTAG. Внешний вид интерфейса окна программы UniCON с программатором представлен на рис. 16.



Рис. 15. Внешний вид осциллографа в программе UniCON

Вся информация о параметрах хранится в объектном словаре устройства CANopen. Файлы объектных словарей представляют собой сложную структуру Си кода, содержащую множество полей с адресами переменных, значениями по умолчанию, максимальных и минимальных значений и т.д. Создать данные файлы вручную занимало бы очень долгое время, а их редактирование требовало бы скрупулёзного пересчета адресов и длин массивов. Для создания словарей объектов была разработана программа COODeDit (CANopen Object Dictionary Editor), которая претерпела множество модификаций, начиная с PHP версии с доступом через веб-браузер, версию в виде приложения для Windows с сохранением профилей в базе данных MySQL на локальном сервере. В настоящее время программа хранит профили локально, а база текстов является общей для всех профилей и реализуется средствами MySQL. Внешний вид программы COODeDit представлен на рис. 17.



The screenshot shows the 'Редактор словарей объектов' (Object Dictionary Editor) window. It contains a table with columns: №, Имя, Диапазон, Описание, Группы, Адрес, По умолчанию, Мин., Макс., Единицы. The table lists various objects such as 'limo_ezba', 'limo_ezba', 'limo_ezba', 'limo_ezba', 'limo_ezba', etc. The table is filtered by 'Группа' and 'Диапазон'.

№	Имя	Диапазон	Описание	Группы	Адрес	По умолчанию	Мин.	Макс.	Единицы
570	5109h	00h	limo_ezba	ЕЗБА	R:0x1132.8.24 н.к.N03h	limo_ezba	0		Одн
571	5109h	01h	limo_ezba	Торед	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0	300		Мин
572	5109h	02h	limo_ezba	ЭДС	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			Мин
573	5109h	03h	limo_ezba	Торед	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			Врем
574	5109h	04h	limo_ezba	Врем	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0	3000		Врем
575	5109h	05h	limo_ezba	Ков. фелтра	R:0x1132.8.24 н.к.N03h	limo_ezba	0		Врем
576	5109h	06h	limo_ezba	Ков. фелтра	R:0x1132.8.24 н.к.N03h	limo_ezba	0	3000	Врем
577	5109h	07h	limo_ezba	стат	Корневой	limo_ezba	0		стат
578	5109h	08h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
579	5109h	09h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
580	5109h	0Ah	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
581	5109h	0Bh	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
582	5109h	0Ch	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
583	5109h	0Dh	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
584	5109h	0Eh	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
585	5109h	0Fh	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
586	5109h	10h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
587	5109h	11h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
588	5109h	12h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
589	5109h	13h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
590	5109h	14h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
591	5109h	15h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
592	5109h	16h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
593	5109h	17h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
594	5109h	18h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
595	5109h	19h	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
596	5109h	1Ah	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
597	5109h	1Bh	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
598	5109h	1Ch	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
599	5109h	1Dh	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
600	5109h	1Eh	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат
601	5109h	1Fh	limo_ezba	стат	W:0x1132.8.24 н.к.N03h	0			стат

Рис. 16. Обновление ПО в UniCON Рис. 17. Окно редактора словарей объектов CANopen

Основные функции программы:

- Редактирование словаря объектов, представленного в виде таблицы: создание, изменение, удаление объектов.
- Генерирование на основе словаря объектов файла для драйвера CANopen.
- Генерирование на основе словаря объектов файла-отчета в Word с наглядным списком параметров (для руководства пользователя устройства).
- Генерирование на основе словаря объектов EDS-файла для работы CANopen устройством сторонних систем верхнего уровня (мастера сети).
- Администрирование базы текстов и перечислений (название параметров) как для одного пользователя, так и синхронизация базы между пользователями одной компании (через базу данных).
- Генерирование списка текстов для ПО верхнего уровня UniCON и для пульта оперативного управления, например, на базе ПУ 20.4.
- Администрирование таблицы масштабирующих коэффициентов (множителей и единиц измерения для перевода значений переменных из представления микроконтроллера (например, 0x274840) в удобный для пользователя вид (12 Ампер).
- Импорт текущих настроек устройства в виде значений по умолчанию для выбранных объектов словаря.

Для управления названиями параметров (текстами элементов словаря объектов) применяется сетевая синхронизация текстов, созданных различными пользователями за счет использования общей базы данных MySQL. Это позволяет в рамках одной компании синхронизировать названия параметров, созданных разными разработчиками, и генерировать единый файл текстов параметров для ПО UniCON. В этом случае при помощи ПО UniCON можно работать с любым устройством, созданным в компании, независимо от того, какой именно разработчик ведет этот проект и администрирует словарь объектов.

Разработанные и рассмотренные в **четвертой главе** инструменты обеспечивают удобную наладку, диагностику, осциллографирование и обновление программного обеспечения распределенных микроконтроллерных систем управления. Поддержка реализована для широкого набора микроконтроллеров Texas Instruments (TMS320F240x, TMS320F28xx и др.), а также для отечественных микроконтроллеров ОАО «НИИЭТ» (гор. Воронеж) на базе ядра Cortex-M4F. В настоящее время через эмуляцию CANopen большинство функций поддерживается и через последовательный коммуникационный интерфейс с протоколом MODBUS RTU и через встроенный модуль USB новых микроконтроллеров семейства Delfino. Разработанные средства наладки и обновления программного обеспечения успешно применяются на гибридных трансмиссиях с силовыми преобразователями, выполненными со степенью защищенности до IP67, и обеспечивают удобный и надежный механизм, как для наладки на самом объекте, так и при удаленной наладке с удаленным подключением через Интернет.

В пятой главе рассмотрены вопросы повышения надёжности функционирования оборудования средствами системы управления. При этом под надёжностью понимается не только поддержание оборудования в исправном состоянии за счет организации программных защит, но и выявление проблем на этапе про-

изводства, превентивная диагностика, а также автоматическая настройка параметров системы управления с целью обеспечения максимальной эффективности электропривода и исключения срабатывания защит из-за неправильной настройки. В данной главе разработаны и реализованы следующие основные способы повышения надежности программными средствами:

- полная диагностика управляющей и силовой электроники на этапе выхода из производства,
- периодическая диагностика и локализация проблем в оборудовании,
- стабилизация и регулирование термического режима работы оборудования,
- защиты от выхода за допустимые режимы работы оборудования,
- превентивная диагностика в процессе эксплуатации оборудования;
- написание программного обеспечения с применением средств оптимизации кода и защит от превышения времени выполнения системы управления;
- автоматическая настройка параметров регуляторов;
- автоматическая подстройка наблюдателей системы управления к изменению параметров электродвигателя;
- снижение тепловой нагрузки на силовой преобразователь за счет оптимизации методов ШИМ.

При производстве контроллеров систем управления неизбежно встает вопрос тестирования с целью определения качества изготовления печатной платы, монтажа и элементов. Выполнять проверку в составе силового преобразователя небезопасно и потенциальные неисправности преобразователя могут мешать выявлению неисправностей контроллера. Поэтому тестирование контроллеров систем управления следует проводить на специализированных стендах под управлением специализированного программного обеспечения. В качестве примера приводится испытательный стенд контроллеров МК17.4, функциональная схема которого изображена на рис. 18.

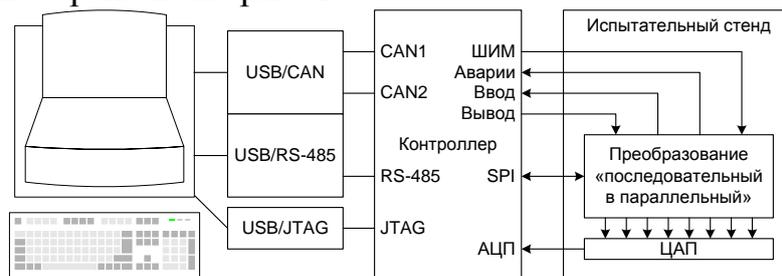


Рис. 18. Функциональная схема испытательного стенда контроллеров МК17.4

Для персонального компьютера разработано специализированное программное обеспечение, написанное на языке Си в интегрированной среде разработки C++ Builder v.6. При первом подключении контроллера осуществляется его программирование тестовым программным обеспечением. Затем со стороны компьютера производится перезапуск микроконтроллера, и последовательно проверяются все устройства контроллера. При этом управление процессом тестирования ведется по CAN-интерфейсу. Этот же интерфейс служит для получения персональным компьютером результатов тестирования. Некоторые тесты выдают лишь признак успешного прохождения теста или код неисправности,

другие, такие как тесты АЦП, возвращают графики погрешностей измерений во всем рабочем диапазоне АЦП. Приводятся примеры организации схем тестирования для контроллера МК10.7. Внешний вид стендов для МК10.7 и МК20.3 приведен на рис. 19а и 19б, соответственно.



Рис. 19. Стенд тестирования МК10.7 (а) и МК20.3 (б)

Далее рассмотрены решения по автоматическому тестированию топологии силовой части электропривода. Рассмотрен алгоритм проверки преобразователя управления мотор-компрессором ИПП-МК. Для этого же преобразователя была разработана система активной термостабилизации силовых модулей с целью увеличения их срока службы за счет снижения влияния эффекта термоциклирования на старение. Показано, что если при выключенном приводе компрессора продолжить пропускать номинальный ток через DCDC-преобразователь и инвертор, то можно существенно снизить колебания температуры силовых модулей, за счет чего срок службы элементов увеличивается приблизительно в три раза.

Разработано и проверено решение по диагностике и локализации проблем с электрической изоляцией в гибридных транспортных средствах. Аварийные участки, связанные с ухудшением качества изоляции, могут возникнуть в любой точке распределенной электромеханической системы. Особенно большую потенциальную опасность представляют системы, в которых применяется мотор-колесо. Преимущество метода состоит в оперативности диагностики и возможности локализовать аварийные устройства без их демонтажа и последующего перебора путем подключения. Метод является бесконтактным. Функциональная схема, описывающая предлагаемый подход, показана на рис. 20. К обесточенной трансмиссии подключается генератор периодических сигналов, измерительное устройство в виде токовых клещей последовательно измеряет ток утечки различных устройств и по фазовому сдвигу между задающим напряжением и током утечки определяет наличие пробоя изоляции.

Далее рассмотрены вопросы обеспечения надёжного функционирования кода ПО системы управления, защиты от резонанса прерываний и повышения производительности кода путём оптимизации типовых функций системы управления.

Отдельное внимание посвящено алгоритмам повышения надежности функционирования замкнутых систем управления за счет начальной иденти-

кации параметров электродвигателя для настройки регуляторов и их автоматической подстройки для обеспечения корректной работы наблюдателей в процессе работы электропривода. Принцип автоматической подстройки реализован путем сравнения оценок потокоцеплений, получаемых с разных наблюдателей (датчикового и бездатчикового), и коррекции соответствующих параметров моделей при наличии невязки. Структура адаптивного наблюдателя представлена на рис. 21.

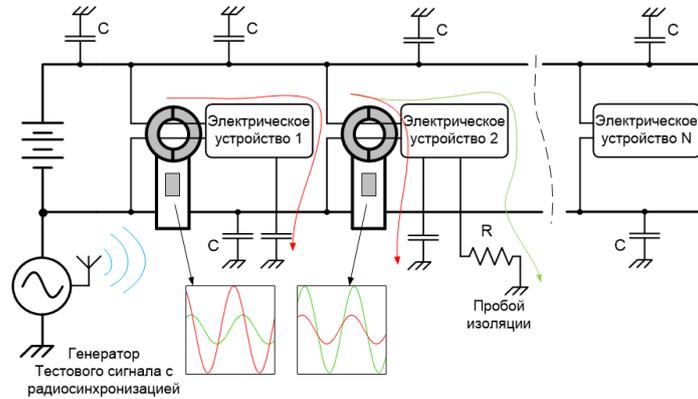


Рис. 20. Функциональная схема системы контроля изоляции

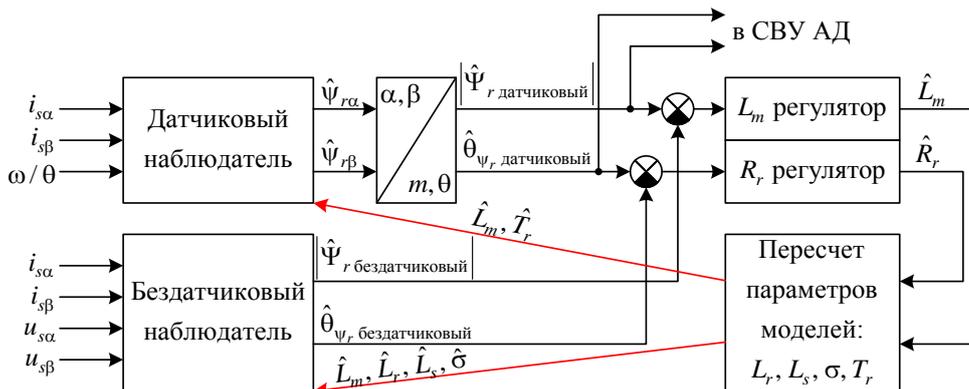


Рис. 21. Функциональная схема системы автоподстройки параметров

Были разработаны и внедрены методы снижения коммутационных потерь при формировании ШИМ, включающие в себя функции одновременной компенсации нелинейностей инвертора, таких как «мертвое» время и падение напряжения на ключах инвертора. Новый алгоритм позволил снизить коммутационные потери на 16% по сравнению с классической векторной ШИМ с привязкой при качественном формировании выходного напряжения. Графики изменения температур радиатора от времени для различных методов ШИМ представлены на рис. 22, а на рис. 23 графики токов в разомкнутой системе при использовании разработанного метода.

Разработанные в **пятой** главе решения позволили в комплексе повысить надежность электроприводов. Так, на автоматизированных стендах было протестировано более 10 000 контроллеров разных типов. Разработанные системы автоматизированного тестирования силовых преобразователей позволяют диагностировать неисправность более детально, чем по стандартным кодам аварий, что позволяет устранять часть неисправностей, удалённо консультируя обслужива-

ющий персонал. Разработанные и внедренные решения в области контроля температурного режима работы полупроводниковых приборов силового преобразователя способствуют увеличению срока службы КТЭО.

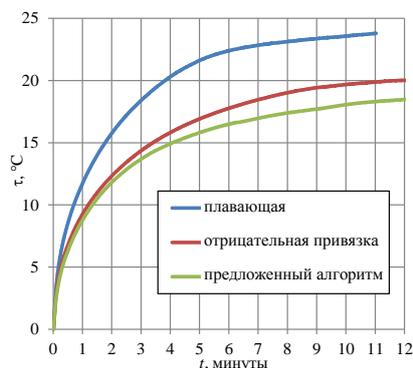


Рис. 22. Нагрев радиатора для различных способов ШИМ

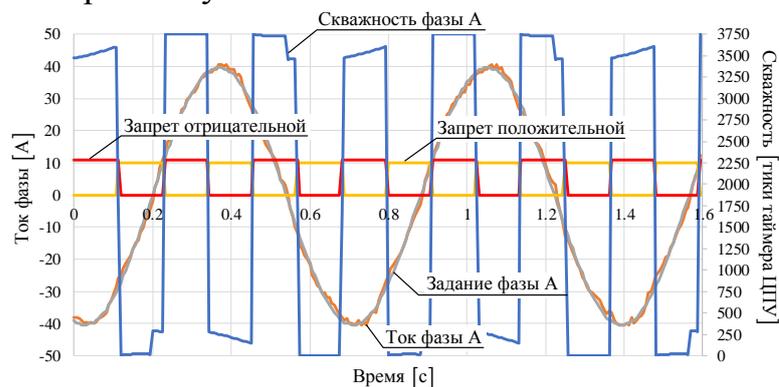


Рис. 23. Работа разработанного алгоритма ШИМ

В процессе наладки гибридных транспортных средств была решена задача контроля и поиска утечек изоляции, что крайне необходимо в условиях сложной распределенной структуры гибридной трансмиссии. Разработанный метод был опробован на гибридной трансмиссии, выполненной в рамках НИР «Крымск» и показал хорошую эффективность. Были успешно локализованы пробой изоляции в кабельной разводке, силовых электронных преобразователях и электродвигателях трансмиссии. Внедренные методы оптимизации кода и контроля правильности его исполнения позволяют на этапе отладки избегать фатальных зависаний системы управления, позволяют проводить обновление программного обеспечения в случае обнаружения ошибок в рабочем ПО.

Разработанные системы автоматической настройки параметров регуляторов и параметров наблюдателей позволяют обеспечивать быструю настройку без участия человека и корректировать работу системы управления при изменениях параметров электродвигателя вследствие изменений его температуры, обеспечивая бесперебойность работы электрооборудования.

Разработанные алгоритмы снижения коммутационных потерь, совместно компенсирующие нелинейности инвертора, позволили снизить максимальную температуру силовых полупроводниковых приборов и других элементов силового преобразователя в среднем на 10% по сравнению с классической векторной ШИМ в зависимости от режима работы и частоты модуляции при сохранении качества выходного напряжения.

В шестой главе рассмотрены вопросы импортозамещения в области цифровых систем управления. Важнейшим вопросом национальной безопасности любой страны является независимость от импортных компонент при производстве транспортного, коммуникационного, военного и других типов оборудования. Если в области специальных материалов, таких как постоянные магниты для изготовления электродвигателей, можно найти иного поставщика, то в случае с электронными компонентами ситуация значительно сложнее. Закупка избыточного запаса электроники также не решает проблему, так как практика показывает, что в любой нештатной ситуации страна-производитель электроники может тем или иным спосо-

бом вмешиваться в работу электронных устройств. Так, уже неоднократно США вмешивалось в работу GPS во время военных конфликтов. Наиболее уязвимой в этом плане оказывается именно управляющая электроника, поэтому важно иметь собственные независимые от иностранных компаний решения в этой области.

По заказу АО «НИИЭТ» гор. Воронеж были сформулированы требования к новому отечественному микроконтроллеру, специализированному для управления электродвигателями. Были сформулированы требования к необходимой периферии и произведено тестирование ядра микроконтроллера Cortex-M4F, чтобы убедиться в его способности решать задачи управления электропривода в реальном времени. Тестирование проводилось на структуре векторного управления синхронным электродвигателем с регуляторами тока и скорости, а результаты были сопоставлены с ядром C28 от компании Texas Instrument и представлены на диаграмме рис. 24. Показано, что производительности ядра Cortex-M4F достаточно для реализации систем векторного управления, хотя оно проигрывает ядру C28 при той же частоте.

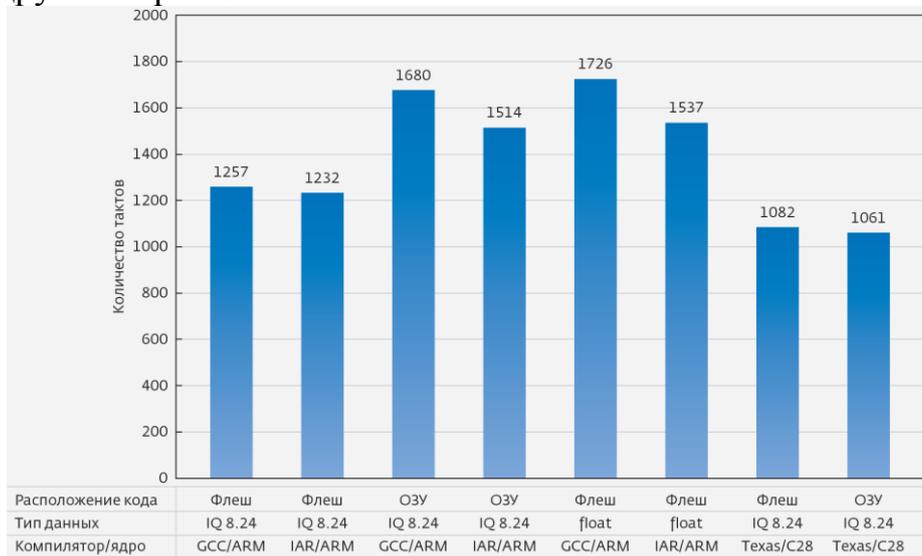


Рис. 24. Система управления для проведения тестов микроконтроллерного ядра

Прототип микроконтроллера K1921BK01T, реализованный на программируемой логической матрице был испытан с макетным силовым преобразователем и СДПМ. Для поставочных образцов K1921BK01T были разработаны платы для отладки ПО в двух исполнениях: совместимом с отладочными платами Texas Instruments формата Control Card, и платы управления общепромышленным преобразователем частоты. Для второго исполнения разработан инвертор мощностью 7,5 кВт. Внешний вид отладочных комплектов представлен на рис. 25.

Для микроконтроллера разработан комплект программного обеспечения, который находится в открытом доступе и может быть использован разработчиками. Он включает в себя базовые структуры системы управления для ДПТНВ, АД, СДПМ и ВИД, программы компьютерной поддержки UniCON, COODEdit, VectorIDE. Кроме того, для целей отладки разработаны имитационные модели ДПТНВ, АД, СДПМ и ВИД, которые можно использовать в целях отладки систем управления без использования реальной силовой части. Переключение между моделью и реальным объектом осуществляется на этапе компиляции проекта.

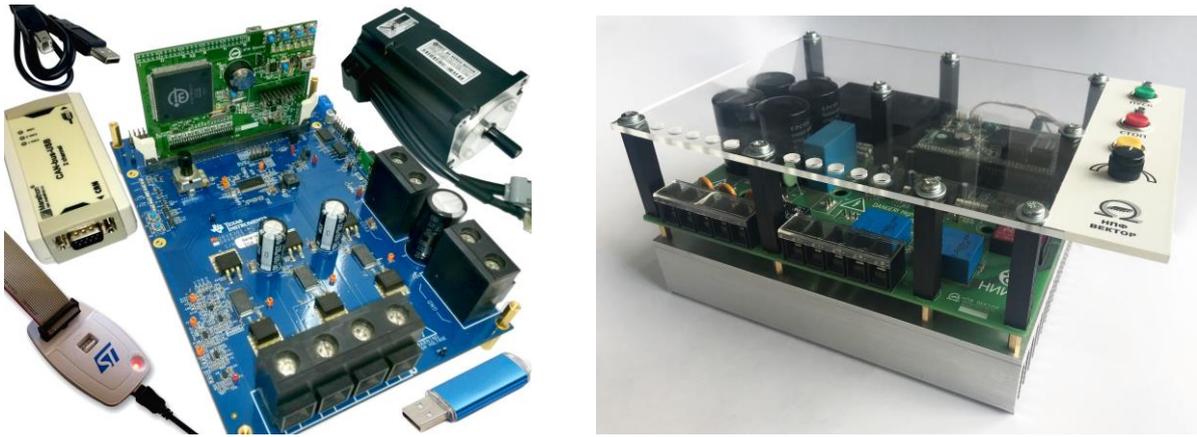


Рис. 25. Отладочные комплекты на микроконтроллере К1921ВК01Т

На базе К1921ВК01Т был разработан контроллер МКУ40 для использования в тяговом электроприводе, совместимый по присоединительным и габаритным размерам с МК17.3. Он был модернизирован до МК40.4 (см. рис. 26) и использован в качестве контроллера тягового привода в трансмиссии БЕЛАЗ-90 с вентильно-индукторным двигателем независимого возбуждения.



Рис. 26. Контроллер МК40.4, применённый в тяговом приводе БЕЛАЗ-90

В рамках **шестой главы** был решен целый комплекс вопросов по импортозамещению в области систем управления, в том числе тяговых электроприводов. Разработанные решения не уступают реализациям систем управления на базе лучших аналогов зарубежных производителей, а с появлением нового поколения микроконтроллеров, который в настоящее время имеет обозначение Процессор-И11, с тактовой частотой 200 МГц и расширенным и усовершенствованным набором периферийных устройств, будут сняты ограничения по производительности центрального процессорного устройства.

Разработанные образцовые решения активно применяются большим числом организаций, а образцовое программное обеспечение и системы помощи разработчику уменьшают время разработки и отладки проектов.

С 2018 года на кафедре АЭП МЭИ обучение студентов проводится на базе К1921ВК01Т по всем предметам, связанным с изучением микроконтроллерных устройств, таким как «Микропроцессорные средства в электроприводе», «Системы управления электроприводов», «Вентильный и шаговый электропривод» и др. Разработки, выполненные в данной главе, в полной мере использованы в учебном процессе.

В заключении обобщены основные результаты работы.

В приложениях приведены примеры внедрений результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов:

1. Анучин А.С., Остриров В.Н., Прудникова Ю.И., Яковенко М.С., Подлесный М.В. Алгоритм термостабилизации силовых полупроводниковых приборов в электроприводе компрессора // Вестник МЭИ, № 3, 2017. С. 13-19.
2. Анучин А.С., Силаев Ф.А., Блок регулирования напряжения для автономной системы электроснабжения пассажирских вагонов поездов дальнего следования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2010, № 6. С. 55-64.
3. Анучин А.С., Федорова К.Г. Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя // Электротехника, Знак, Москва, 2014, № 2. — С. 21—25.
4. Анучин А.С. Методики расчета параметров цифрового ПИ-регулятора в электроприводе / Calculation techniques for parameters of a digital PI controller in an electrical drive // Электротехника, Знак, Москва, 2014, № 5. — С. 32—39 / Russian Electrical Engineering, May 2014, Volume 85, Issue 5, P. 290—297.
5. Анучин А.С., Кульманов В.И., Шпак Д.М., Беляков Ю.О., Остриров В.Н. Моделирование самообучающейся системы управления инвертором преобразователя частоты для подавления высших гармоник // Вестник МЭИ, 2017, №4. — С. 75—82.
6. Анучин А.С. Модернизация курса «Системы управления электроприводов» на кафедре автоматизированного электропривода МЭИ / А.С. Анучин, Д.И. Савкин // Электротехника, Знак, Москва, 2015, № 1. — С. 48—52.
7. Анучин А.С., Алякин Д.И., Козаченко В.Ф., Лашкевич М.М., Остриров В.Н. Направления развития и оптимизации систем электроприводов городского гибридного и электрического транспорта / Trends in development and optimization of electric drive systems for hybrid and electric urban transport // Электротехника, Знак, Москва, 2015, №1. — С. 5—9 / Russian Electrical Engineering, January 2015, Vol. 86, Issue 1, P. 1—4.
8. Анучин А.С. Обновление программного обеспечения встроенных систем управления преобразователей частоты и источников питания по CAN-сети // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 6. — С. 25—29.
9. Анучин А.С. Прогнозирование сигнала обратной связи для ПИ-регулятора предельного быстрого действия / Feedback-signal prediction for a deadbeat PI controller // Электротехника, Знак, Москва, 2014, № 6. — С. 27—36 / Russian Electrical Engineering, June 2014, Vol. 85, Issue 6, P. 367-375.
10. Анучин А.С. Проектирование систем управления со свободно конфигурируемой структурой для преобразователей учебных лабораторных стендов / А.С. Анучин, А.М. Лисицкая // Главный энергетик, 2010, № 6. — С. 66—73.
11. Анучин А.С., Ханова Ю.М., Гуляев И.В. Разработка метода быстрого и точного моделирования электроприводов // Промышленная энергетика. 2016. № 4. — С. 28-33.

12. Анучин А.С., Реализация и испытания новой перспективной системы генерации электроэнергии переменного тока для воздушных судов / Анучин А.С., Беляков Ю.О., Габидов А.А. и др. / Design and tests of a new promising ac electric-power generation system for aircraft // Электротехника, Знак, Москва, 2015, №1. - С. 59-65 / Russian Electrical Engineering, January 2015, Vol. 86, Issue 1. — P. 39—45.
13. Анучин А.С. Сеть CAN и протокол верхнего уровня CANopen в современном электроприводе / А.С. Анучин // Электричество. 2008. № 5. — С. 23—29.
14. Анучин А.С. Структуры цифрового ПИ-регулятора для электропривода / Structures of a digital PI controller for an electric drive // Электротехника, Знак, Москва, 2014, № 7. С. 02-06 / Russian Electrical Engineering, July 2014, Volume 85, Issue 7, P. 419-423.
15. Остриров В.Н. Анализ особенностей эксплуатации частотно-регулируемого электропривода компрессора вагона метро / В.Н. Остриров, А.С. Анучин, А.А. Габидов, Д.В. Репецкий // Промышленная энергетика. 2013. № 9. — С. 14—16.
16. Рассудов Л.Н. Использование аппаратного ускорителя на базе ПЛИС в системах управления электроприводов / Л.Н. Рассудов, А.П. Балковой, А.С. Анучин, И.В. Гуляев // Промышленная энергетика. 2016. № 3. — С. 40—43.

В трудах конференций и изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science:

17. Aliamkin D., Anuchin A., Lashkevich M., Briz F. Sensorless control of two-phase switched reluctance drive in the whole speed range // IECON 2016 — 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 24-27, 2016, Firenze (Florence), Italy, 2016. — P. 2917 — 2922.
18. Anuchin A., Aliamkin D., Lashkevich M., Shpak D., Zharkov A., Briz F. Minimization and redistribution of switching losses using predictive PWM strategy in a voltage source inverter, // 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), 31 Jan. —2 Feb. 2018.
19. Anuchin A., Astakhova V., at al. Optimized method for speed estimation using incremental encoder // 2017 International Symposium on Power Electronics (Ee), 19—21 Oct. 2017, Novi Sad, Serbia.
20. Anuchin A., Belyakov G., Fedorova K., Vagapov Y. Insulation fault detection and localisation in electric and hybrid electric vehicles // 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016. Coimbra, Portugal.
21. Anuchin A., Briz F., Rassudov L., Gulyaev I. Implementation of fast and accurate modeling method of electric drives // 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON).
22. Anuchin A., Briz F., Shpak D., Lashkevich M. PWM strategy for 3-phase 2-level VSI with non-idealities compensation and switching losses minimization // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 21—24 May 2017, Miami, FL, USA.
23. Anuchin A., Bychkov M. The modern electric drives — Using of information technologies and the problems of education // 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 12—13 Oct. 2017, Riga, Latvia.
24. Anuchin A., Dianov A. at al. Speed Estimation Algorithm with Specified Bandwidth for Incremental Position Encoder // 17th Mechatronika 2016, December 7 — 9, 2016, Prague.
25. Anuchin A., Grishchuk D., at al. Real-time model of switched reluctance drive for educational purposes // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Рига, Латвия, 2016.

26. Anuchin A., Gulyaeva M., Briz F., Gulyaev I. Modeling of AC voltage source inverter with dead-time and voltage drop compensation for DPWM with switching losses minimization // 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS) 6—9 June 2017, Cluj-Napoca, Romania.
27. Anuchin A., Il'in G., Belyakov G., Shpak D. Insulation monitoring system for electric drives in TN networks // 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS), 6—9 June 2017, Cluj-Napoca, Romania.
28. Anuchin A., Khanova Y., Shpak D., Vagapov Y. Real-time Model of Synchronous Reluctance Motor drive for laboratory based investigations // IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 24-27, 2016, Firenze (Florence), Italy, 2016. — P. 4989 — 4994.
29. Anuchin A., Kozachenko V. Current Loop Dead-beat Control with the Digital PI-controller // 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), 26—28 August 2014, Lappeenranta, Finland.
30. Anuchin A., Kulmanov V., Belyakov Y. Simulation of Power Converter Control System with Compensation of Harmonic Distortion in Output Voltage Waveform // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015, Omsk).
31. Anuchin A., Lashkevich M., Aliamkin D., Briz F. Achieving maximum torque for switched reluctance motor drive over its entire speed range // 2017 International Symposium on Power Electronics (Ee), 19—21 Oct. 2017, Novi Sad, Serbia.
32. Anuchin A., Ostrirov V., et al. Thermal stabilization of power devices for compressor drive with start/stop operation mode // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON).
33. Anuchin A., Savkin D., Khanova Y., Grishchuk D. Real-time Model for Motor Control Coursework // 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2015, Riga)/ — P. 427 — 430.
34. Anuchin A., Shpak D., Aliamkin D., Briz F. Adaptive observer for field oriented control systems of induction motors // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON).
35. Anuchin A., Shpak D., et al. A method of determining the maximum performance torque-speed characteristic for an induction motor drive over its entire speed range // 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 12—13 Oct. 2017, Riga, Latvia.
36. Anuchin A., Vagapov Y. Configurable Control Systems of Power Converters for Instructional Laboratories // 2015 Internet Technologies and Applications (ITA) (United Kingdom Wrexham Glyndwr University), 8—11 September 2015, P. 18 — 22.
37. Anuchin A.S., Kulmanov V.I., Kozachenko V.F., Shpak D.M. Optimization of the Division Operation for Real-time Control Systems // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015, Omsk).
38. Briz F., Anuchin A., Gulyaev I. Current regulation of AC machines under voltage constraints // 2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON).
39. Do H.D., A. Anuchin, D. Shpak, A. Zharkov, A. Rusakov Overvoltage protection for interior permanent magnet synchronous motor testbench // 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), 31 Jan. —2 Feb. 2018.
40. Ilyin M., Bobrov M., Lapshina V., Briz F., Anuchin A. Analysis of the influence of the switching strategy on the IGBTs temperature in AC drives // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON).

41. Ilyin M., Briz F., Lapshina V., Bobrov M., Anuchin A. Influence of the PWM strategy on the IGBTs thermal behavior in AC drives // IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 24—27, 2016, Firenze (Florence), Italy, 2016. — P. 4337—4342.
42. Knupfer M., Sprake D., Vagapov Y., Anuchin A. Cross impact analysis of Vehicle-to-Grid technologies in the context of 2030 // 2016 IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS).
43. Kondratyeva O., Korolev I., Sherbacheva O., Bulatov R., Anuchin A. Analysis of compliance of hybrid vehicles with safety requirements for customs clearance in the Russian federation // 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) 12—13 Oct. 2017, Riga, Latvia.
44. Kulik E., Tran X.T., Anuchin A., Vagapov Y. GPS-track data processing for the optimization of the powertrain for hybrid electric vehicles // 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 12—13 Oct. 2017, Riga, Latvia.
45. Kulmanov V., Anuchin A., Bychkova E., Prudnikova Y. Simulation of Power Converter with Repetitive Control System for Higher Harmonics Elimination // 2016 IX International Conference on Power Drives Systems (ICPDS), Perm, Russia.
46. Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F. Control strategy for synchronous homopolar motor in traction applications // IECON 2017 — 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 29 Oct. —1 Nov. 2017, Beijing, China. — P. 6607 — 6611.
47. Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F. Investigation of self-sensing rotor position estimation methods for synchronous homopolar motor in traction applications // IECON 2017 — 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 29 Oct. —1 Nov. 2017, Beijing, China. — P. 8225 — 8229.
48. Lashkevich M., Anuchin A., Aliamkin D., Briz F. Self-sensing control capability of synchronous homopolar motor in traction applications // 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 12—13 Oct. 2017, Riga, Latvia.
49. Rassudov L., Balkovoi A., Anuchin A., Gulyaev I. FPGA implementation of servo-drive control system // 2016 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON).
50. Savkin D., Anuchin A., et al. Real-time model of switched reluctance drive based on a LUT magnetization curve for educational purposes // 2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, 1-3 June 2017, Sofia, Bulgaria. P. 480-483.
51. Shilina A., Lupin S., Barhotkin V., Anuchin A., et al. Modelling of Smart Control System for plug-in electric vehicle charging stations // 2015 Internet Technologies and Applications (ITA); P. 370—373.

Материалы докладов, опубликованные в сборниках трудов Всероссийских и международных конференций, не входящих в международные индексы цитирования:

52. Анучин А.С. Блок регулирования напряжения для автономной системы электропитания пассажирских вагонов поездов дальнего следования / А.С. Анучин, Ф.А. Силаев // Сборник материалов конференции «Силовая электроника», 2009. — С. 31—33.
53. Анучин А.С. Выбор рациональной структуры цифровой системы управления источников вторичного стабилизированного питания переменного тока / А.С. Анучин, В.И. Кульманов, Ю.О. Беляков // Вестник Национального технического университета

«ХПИ»: Проблемы автоматизированного электропривода, теория и практика, 2013, № 36 (1009).— С. 234—235.

54. Анучин А.С. Двухмассовая тепловая модель для энергоэффективного выбора асинхронного двигателя / А.С. Анучин, К.Г. Федорова // Тез. докл. VII Междунар. (XVIII Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу, Иваново, 02 —04 октября 2012 г. —С. 179—182.

55. Анучин А.С. Компенсация гармонических искажений выходного напряжения в источниках питания с синусным фильтром / А.С. Анучин, В.И. Кульманов, Ю.О. Беляков // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. —Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2014. Т.1 — С. 422—426.

56. Анучин А.С. Мифы и легенды современного электропривода / А.С. Анучин // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу, Саранск, 07 — 09 октября 2014 г. Т.1. —С. 42—46.

57. Анучин А.С. Моделирование силовых преобразователей в исследовательских задачах и учебном процессе / А.С. Анучин // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. — Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2014. Т.2 — С. 544—547.

58. Анучин А.С. Пределы настройки регуляторов в цифровых системах управления / А.С. Анучин // Доклады науч.-практ. семинара «Методы и средства наладки электроприводов». — М.: Издательство МЭИ, 2014. — С. 61—83.

59. Анучин А.С. Состояние и перспективы развития городского гибридного и электрического тягового электропривода в России / А.С. Анучин, Д.И. Алямкин, В.Ф. Козаченко и др. // Труды VIII Междунар. (XIX Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2014: в 2 т. — Саранск: Изд-во Мордовского ун-та, 2014. Т.1. С. 24—27.

60. Анучин А.С. Состояние и перспективы развития электротрансмиссий для электрического и гибридного транспорта на 2015 год / А.С. Анучин, В.Ф. Козаченко, М.М. Лашкевич и др. // Сборник докладов научно-технической конференции «Актуальные вопросы и перспективы развития машиностроения», 3 декабря 2015 года, г. Москва. — С. 43—50.

61. Анучин А.С. Широтно-импульсная модуляция методом реализации мгновенных фазных потенциалов для трехфазных инверторов напряжения / А.С. Анучин // Труды V Междунар. (16 Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, Санкт-Петербург, 2007. —С. 263—265.

Учебники и учебные пособия, главы книг:

62. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов / А.С. Анучин. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 373 с.

63. Анучин А.С. Частотное управление асинхронного электропривода // Энциклопедия «Машиностроение», том IV-2 «Электропривод. Гидро- и виброприводы», книга 1 «Электропривод». — М.: Машиностроение, 2012. — С. 256—279.

64. Анучин А.С., Алямкин Д.И., Дроздов А.В., Козаченко В.Ф., Тарасов А.С. Встраиваемые высокопроизводительные системы управления // Учебное пособие, Издательский дом МЭИ, Москва, 2010. — 270 с.