

Э **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА** **Т** **2 2000**

70

ЛЕТ

КАФЕДРЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА



**МОСКОВСКОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
(ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА)**





ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издается с января 1930 года

№ 2 ФЕВРАРЬ 2000

УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ»
(г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ
«ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАН-
НЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО»
(г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В.,
МЕЩЕРЯКОВ В.М., ЩЕРБАКОВ В.Г.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета),
ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛО-
ВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
КОЧЕТКОВ В.Д.

БЕЛКИН Г.С., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х.,
ДОЛКАРТ В.М., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,
МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А.,
РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВС-
КИЙ О.В. (зам. главного редактора),
ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б.,
УСОВ Н.Н., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕН-
ЦЕВ С.Н.

Издатель: ЗАО "Знак"

103012, Москва, Б.Черкасский пер., 2/10

Адрес редакции:

123242, Москва,

Зоологическая ул., 11, комн. 213

Факс/телефон: 254-11-52

E-mail elektrotehnika@mtu-net.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Козырев С.К. История образования и развития кафедры АЭП МЭИ	2
Богаченко Д.Д. Основатели научно-педагогической школы кафедры автоматизированного электропривода МЭИ	4
Москаленко В.В. Учебный процесс на кафедре автоматизированного электропривода МЭИ	7
Осипов О.И. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод в учебных лабораториях кафедры автоматизированного электропривода МЭИ	9
Козаченко В.Ф. Новые образовательные технологии при подготовке специалистов в области разработки цифровых систем встроенного управления двигателями	12
Ладыгин А.Н. Научная работа кафедры АЭП — направления и результаты	16
Ключев В.И., Миронов Л.М., Резниковский А.М., Фомин С.А. Разработки и исследования экскаваторных электроприводов	20
Терехов В.М. Современные способы управления и их применение в электроприводе	25
Ильинский И.Ф., Бычков М.Г. Вентильно-индукторный привод для легких электрических транспортных средств	28
Масандилов Л.Б., Анисимов В.А., Горнов А.О., Крикунчик Г.А., Москаленко В.В. Опыт разработки и применения асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения	32
Балковой А.П., Сливинская Г.А., Луценко В.Е. Разработки шагового электропривода на кафедре АЭП МЭИ	36
Козаченко В.Ф., Обухов Н.А., Веселов М.В. Новый контроллер для встроенных применений в системах управления приводами переменного тока	41
Кудрявцев А.В. Развитие частотно-регулируемого асинхронного электропривода на кафедре АЭП МЭИ	47
Овсянников Е.М., Цаценкин В.К. Следящий электропривод с малым передаточным числом редуктора для систем наведения ..	50
Садовский Л.А., Виноградов В.Л. Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого электропривода	54
Сергиевский Ю.Н., Платонова В.Е. Опыт работы испытательной лаборатории электротехнических изделий МЭИ	59
Перечень авторов опубликованных статей	61

Ассоциация «Автоматизированный электропривод» поздравляет сотрудников кафедры электропривода МЭИ с 70-летним юбилеем кафедры. Коллектив кафедры – достойный продолжатель дела талантливых ученых, основателей кафедры, создавших фундаментальную часть теории электропривода.

Последующие поколения, ученики с благодарностью вспоминают талантливых профессоров кафедры Д.П. Морозова, А.Т. Голована, М.Г. Чиликина, В.П. Бычкова, А.С. Сандлера, А.А. Сиротина, М.М. Соколова – создателей отечественной передовой научной школы электроприводчиков.

Наши предшественники хорошо понимали значение электрификации, предвидели темпы роста электровооруженности труда и эффективность ее применения во всех отраслях народного хозяйства.

Они сознавали, что высокие темпы производства электроэнергии, заложенные в планах ГОЭЛРО, будут оказывать исключительное влияние на все стороны жизни и деятельности человека, на окружающую среду.

Они понимали сложность задачи, связанную с изысканием и созданием принципиально новых эффективных методов потребления огромных количеств электроэнергии, в свою очередь преобразуемой в механическую, тепловую, световую и другие виды энергии.

Не может произойти серьезный сдвиг в народном хозяйстве, если это не будет сопровождаться перевооружением производственных процессов и технологий на электрической основе. И в первую очередь это отразится на электроприводе, потребляющем более 60% вырабатываемой электроэнергии.

Без совершенного электропривода это сделать невозможно. Электропривод должен постоянно развиваться. Этот процесс объективный, как объективен процесс создания новых технологий при любых производственных отношениях.

И, действительно, мы видим как последние достижения физики полупроводников, резкое улучшение свойств используемых магнетомягких и магнитотвердых материалов, достижения химии в области полимерных теплостойких изоляционных материалов, успехи микроэлектроники и т.д. позволяют качественно изменить характеристики электрических двигателей, преобразователей и весь арсенал средств современного электропривода. Все это надежно технически обеспечивает дальнейшее развитие электропривода.

Нет необходимости подробно рассказывать о влиянии кафедры электропривода МЭИ – передовой школы электроприводчиков – на развитие электропривода. Достаточно сказать, что эта научная школа признана мировой научно-технической общественностью за ее вклад в мировую науку по электроприводе. Научные труды ученых – основателей этой школы и их последователей – широко известны в мире.

За прошедшие годы ученые кафедры выполнили огромный комплекс научных пионерских работ, большая часть которых внедрена в производство.

За 70 лет кафедра подготовила огромный отряд высококвалифицированных инженеров и ученых по электроприводе, ныне работающих в науке, производстве и эксплуатации.

По инициативе и активной помощи кафедры в различных вузах России и стран СНГ организованы аналогичные кафедры, которые ведут успешно научно-педагогическую работу в области автоматизированного электропривода.

Ассоциация «Автоматизированный электропривод» высоко ценит труд ныне работающего коллектива кафедры по подготовке квалифицированных инженеров и ученых электроприводчиков.

Пусть живнут и развиваются славные традиции кафедры Электропривода.

Здоровья и творческих успехов вам, дорогие Коллеги.

История образования и развития кафедры АЭП МЭИ

КОЗЫРЕВ С.К.

В 1930 г. в соответствии с приказом ВСНХ СССР «В целях ускорения темпа и поднятия качества подготовки инженеров» были разукрупнены МВТУ и институт народного хозяйства им. Плеханова. На базе электротехнического факультета МВТУ было создано Московское высшее энергетическое училище, а на базе электропромышленного факультета ИНХ им. Плеханова — Московский энергетический институт. С начала 1930/31 учебного года два новых вуза были объединены в один — Московский энергетический институт (МЭИ).

Одновременно с образованием МЭИ была создана и кафедра электрооборудования промышленных предприятий (ЭПП). Этому способствовало наличие на электротехническом факультете МВТУ специальности «Электрооборудование промышленных предприятий» и на электропромышленном факультете ИНХ им. Плеханова специализации «Фабрично-заводское электрохозяйство».

Созданию кафедры ЭПП в МЭИ предшествовало значительное развитие теории и практики электропривода, становление которого как науки происходило на базе бурного развития электротехники, электрических машин в конце XIX и начале XX в.

В становлении теории электропривода как самостоятельной науки огромную роль сыграл профессор ЛЭТИ С.А. Ринкевич, опубликовавший в 1925 г. учебное пособие «Электрическое распределение механической энергии», в 1932-1934 гг. — двухтомный труд «Электрическое распределение механической энергии», а в 1938 г. — учебник «Теория электропривода».

К основателям отечественной школы электропривода следует отнести профессора ЛПИ В.К. Попова, издавшего в 1932-1935 гг. трехтомный учебник «Применение электродвигателей в промышленности».

Дальнейшее развитие отечественная теория электропривода получила в трудах А.В. Башарина, А.Т. Голована, Д.П. Морозова, М.Г. Чиликина, Ю.А. Сабинина и др. И в настоящее время электропривод продолжает интенсивно развиваться.

Первым заведующим кафедрой ЭПП МЭИ был профессор Г.П. Леви — крупный специалист в области горно-металлургического электропривода, сочетавший практический опыт внедрения электропривода в промышленность с развитием его теории. Он до этого в течение многих лет читал курс «Электрооборудование промышленных предприятий» на электротехническом факультете МВТУ. Большое влияние на развитие кафедры оказали профессора С.А. Ринкевич, А.Н. Ларионов, Е.В. Нитусов, в разные годы заведовавшие кафедрой. Трудно переоценить вклад в совершенствование учебного

процесса и организации научных исследований на кафедре Д.П. Морозова и А.Т. Голована. С первых дней образования кафедры в формировании кадрового состава, совершенствовании учебных планов и учебных дисциплин оказывали помощь Всесоюзный электротехнический институт и крупнейшая в то время в Советском Союзе проектно-монтажная организация — Центроэлектромонтаж и др. Работники этих организаций читали учебные курсы, руководили курсовым и дипломным проектированием.

С начала своего возникновения кафедра имела настоятельную необходимость в создании лаборатории.

В 1933 г. ей было передано помещение бывшего физкультурного зала на территории ИНХ им. Плеханова.

В 1934 г. были смонтированы первые лабораторные работы: методы определения момента инерции и снятие механических характеристик двигателей переменного и постоянного тока.

В 1935 г. добавилась еще одна задача — исследование тельфера, для которого был смонтирован крановый путь. В 1936 г. В.И. Яковлевым и Ф.В. Чумаковым был составлен технический проект оборудования лаборатории, по которому в последующие годы была произведена установка учебных работ лаборатории. Весь дальнейший рост лаборатории в отношении организации и оформления учебных работ происходил при непосредственном участии В.И. Яковлева. По этому проекту в лаборатории были установлены распределительный щит, стенды для исследовательских работ, пульт для аппаратуры и приборов и мотор-генераторные установки. Из учебных задач были поставлены: исследование электроприводов компрессора, тельфера, работы по снятию механических характеристик асинхронного двигателя и двигателей постоянного тока и определению момента инерции.

В 1937 г. лаборатория получила некоторое количество релейно-контакторной аппаратуры и панели управления, в связи с чем пополнилась новыми задачами по управлению электроприводами: исследование контакторов переменного тока и электромагнитных реле, составление принципиальной схемы управления двигателем постоянного тока по имеющейся монтажной схеме.

Примерно в это же время в лаборатории были установлены два станка: шепинг и сверлильный, на котором в 1938 г. были смонтированы задачи по определению усилий и моментов, а также пути и скорости резания.

Перечень учебных лабораторных работ, установленных к концу 1938 г.:

1. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазовым ротором.
 2. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения.
 3. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения.
 4. Согласно-встречное включение двигателей постоянного тока.
 5. Определение допустимого числа включений в час короткозамкнутого асинхронного двигателя.
 6. Снятие универсальной характеристики асинхронного короткозамкнутого двигателя.
 7. Определение момента инерции.
 8. Сборка схемы автоматического управления двигателем параллельного возбуждения.
 9. Сборка схемы автоматического управления двигателем последовательного возбуждения.
 10. Исследование двухскоростного двигателя.
 11. Исследование электропривода компрессора.
 12. Исследование электропривода вентилятора.
 13. Счетно-импульсные схемы.
 14. Переходные процессы в системе генератор — двигатель.
 15. Контактный регулятор скольжения асинхронного двигателя.
 16. Исследование релейно-контакторной аппаратуры.
- Примерно такое содержание учебных работ лаборатории было до 1945 г.

В 1946 г. лаборатория была переведена в лабораторный корпус института на Красноказарменной улице. В новом помещении лаборатория пополнилась рядом новых задач.

В послевоенные годы в помещениях лаборатории был смонтирован реверсивный стан холодной прокатки. Его электрооборудование полностью соответствовало уровню того времени, а все панели управления были промышленного изготовления и ничем не отличались от применяемых на прокатных станах металлургических заводов. Помощь в монтаже и наладке стана оказывали работники Центрального научно-исследовательского института металлургического машиностроения (ЦНИИметмаш). Стальную ленту для прокатки во время лабораторных занятий поставлял Магнитогорский металлургический комбинат, а необходимые операции по отжигу холоднокатаной полосы выполнял московский металлургический завод «Серп и Молот». Схемы управления станом постоянно модернизировались в соответствии с развитием электроприводов прокатных станов.

Одновременно в качестве учебной лабораторной работы использовался мостовой кран, который был смонтирован для сборки прокатного стана. Схемы управления тележкой мостового крана и подъемным крюком составлялись студентами во время занятий, после этого они собирались и проводилось опробование работы крана.

Обе указанные работы были довольно сложными, но представляли большой интерес для студентов.

Позднее были смонтированы и использовались в учебном процессе лабораторные работы, предусматривающие изучение:

- электропривода плоско-шлифовального станка;
- системы управления фрезерным станком с числовым программным управлением;
- частотно-регулируемого электропривода рольганга с индивидуальным приводом роликов;
- панелей управления крановых электроприводов, изготавливаемых заводом «Динамо».

По мере развития электропривода изменялись состав и содержание лабораторных работ. При появлении систем подчиненного регулирования с последовательной коррекцией на кафедре была модернизирована учебная лаборатория по теории электропривода с одновременным внесением существенных изменений в постановку самого курса «Теория электропривода». Эти изменения проходили под руководством В.И. Ключева. В 1985 г. им издан учебник «Теория электропривода», который отражал современный уровень автоматизированного электропривода и основные тенденции его развития.

Первые образцы тиристорных электроприводов с прямым микропроцессорным управлением, освоенные запорожским заводом «Преобразователь», были установлены в учебной лаборатории кафедры. Наряду со студентами эти приводы осваивали сотрудники многих отделений ГПИтяжпромэлектропроекта.

В настоящее время в связи с широким применением в промышленности частотно-регулируемого асинхронного электропривода в учебных лабораториях установлены преобразователи частоты ведущих фирм мира. Создание учебных лабораторных работ с преобразователями частоты проходило под руководством О.И. Осипова. В 1999 г. при активном участии В.Ф. Козаченко и М.Г. Бычкова создана учебная лаборатория по изучению микропроцессорных систем управления, где используются микроконтроллеры для управления двигателями фирмы «Motorola» и микроконтроллеры на базе новейших сигнальных микропроцессоров фирмы «Texas Instruments».

Учебные планы кафедры с момента ее возникновения подвергались непрерывному изменению как в части номенклатуры и содержания специальных курсов, так и в отношении направленности профилирующих учебных дисциплин.

До 1934—1935 г. специальность имела специализации (фуркации или уклоны, как они именовались тогда), отличающиеся одна от другой некоторыми специальными дисциплинами и направленностью дипломного проектирования:

- электрооборудование машиностроительной промышленности (машиностроение);

- электрооборудование текстильной промышленности;
- электрооборудование горно-рудных предприятий;
- электрооборудование химической промышленности.

В настоящее время кафедра перешла на многоуровневую подготовку и продолжает совершенствовать состав и содержание преподаваемых дисциплин.

За годы существования кафедра постоянно значительное внимание уделяла научно-исследовательским работам, сосредотачиваясь на наиболее актуальных направлениях развития автоматизированного электропривода.

Это подтверждается тем, что дважды — в 1967 и в 1981 гг. — сотрудники кафедры удостоивались Государственной премии СССР. На кафедре были разработаны одни из первых в стране электроприводы для станков с числовым программным управлением, многокоординатные электроприводы для гибких автоматизированных производств, тиристорные преобразователи постоянного тока и многое другое.

За годы существования кафедрой подготовлено огромное количество выдающихся специалистов, только перечисление которых заняло бы очень много места. Поэтому напомним лишь о некоторых из них.

Среди выпускников кафедры первого выпуска в 1935 г. были М.Г. Чиликин и В.П. Бычков, много сделавшие для развития кафедры. Особенно велика роль в этом М.Г. Чиликина, который бессменно на протяжении 25 лет с 1952 г. возглавлял кафедру. Под его влиянием кафедра приобретала современный облик и в 1975 г. по его инициативе была переименована в кафедру автоматизированного электропривода.

Ряд выпускников стали известными учеными, связавшими свою жизнь с кафедрой и внесшими неоценимый вклад в совершенствование учебного процесса и развития научной школы кафедры. Среди них А.С. Сандлер, А.А. Сиротин, М.М. Соколов и др. Преподавательский и научный штат кафедры и сейчас укомплектован, в основном, выпускниками кафедры разных лет. Среди них крупные ученые, широко известные не только в РФ, но и за рубежом — В.И. Ключев, В.М. Терехов, Н.Ф. Ильинский и др. Профессор Н.Ф. Ильинский был заведующим кафедрой с 1978 по 1994 гг. Он добился концентрации усилий ученых кафедры на приоритетных направлениях развития техники. Резко возросла в этот период роль кафедры как базовой в области электропривода в стране, а также в деле подготовки кадров высшей квалификации для вузов Советского Союза и зарубежных стран.

Многие выпускники кафедры стали известными учеными и крупными руководителями производств и научно-исследовательских организаций. Среди них: Н.Н. Дружинин, О.В. Слежановский, А.С. Филатов, М.Г. Юньков, Г.М. Иванов, Г.Н. Лыщинский, А.М. Быстров, Ю.А. Борцов, В.Д. Кочетков и др.

На многих предприятиях страны главными энергетиками работают выпускники кафедры, а электротехнические службы укомплектованы специалистами, окончившими МЭИ.

Ядро преподавательских коллективов многих кафедр электропривода в вузах страны составляют выпускники кафедры АЭП.

И сегодня коллектив кафедры продолжает работать по совершенствованию учебного процесса, активно занимается научными исследованиями на приоритетных направлениях развития электропривода и бережно хранит лучшие традиции, заложенные основателями научной школы кафедры.

Основатели научно-педагогической школы кафедры автоматизированного электропривода МЭИ

БОГАЧЕНКО Д.Д.

В организации и становлении кафедры автоматизированного электропривода в начале 30-х годов нашего столетия принимали активное участие известные ученые, крупные специалисты того времени: профессора С.А. Ринкевич, Г.П. Леви, А.Н. Ларионов. Они смогли организовать и сплотить вокруг себя верных учеников и соратников, которые, опираясь на их знания и опыт практической деятельности, создавали, совершенствовали и развивали основы научно-педагогической школы кафедры. Это были молодые ученые, практики, а также первые выпускники-электроприводчики.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru



Д.П.Морозов

работы носили пионерский характер. Являясь одним из первых исследователей электроприводов реверсивных станов горячей прокатки, он предложил методы исследования и расчета переходных процессов, что нашло широкое применение в работах электротехнических проектных и научно-исследовательских организаций. Результаты теоретических и экспериментальных исследований электроприводов станов хо-

лодной прокатки получили признание в проектных работах при создании новых систем управления. Им тщательно изучены вопросы, связанные с изменением натяжения металла при прокатке. Также широко известны результаты его исследований асинхронных электроприводов при включении в цепь ротора или статора выпрямительных трехфазных мостов.

Свою исследовательскую работу Д.П.Морозов успешно сочетал с практической деятельностью по развитию электроприводов прокатных станов, вел работы по совершенствованию электроприводов блюмингов Кузнецкого и Магнитогорского металлургических заводов, был консультантом в Центральном Конструкторском бюро металлургического машиностроения (ЦКБММ), Центральном конструкторском бюро «Электропривод».

Большую роль сыграл Д.П.Морозов в подготовке инженерно-педагогических кадров. Его лекции, так же как учебники и монографии, отражали последние достижения науки и техники. Так, его книга «Теория электропривода и автоматика реверсивных прокатных станов» (1949 г.) стала классическим трудом в соответствующей области и многие годы являлась настольной книгой специалистов. Большой популярностью пользовался его учебник «Основы электропривода», изданный в 1950 г.

Одним из главных итогов деятельности профессора Д.П.Морозова является создание научной школы по электроприводу прокатных станов. Его ученики впоследствии стали видными учеными и руководящими работниками промышленности. Среди них профессора Н.Н.Дружинин, О.В.Слежановский, А.С.Филатов и многие другие.

Другим видным ученым, одним из создателей научной школы автоматизированного электропривода, был профессор Андрей Трифонович Голован. Он в 1926 г. окончил Ленинградский электротехнический институт и с 1934 г. работал на кафедре, где в 1943 г. защитил докторскую диссертацию, был заведующим кафедрой, деканом факультета электрификации промышленности и транспорта.



А.Т.Голован

А.Т.Голован много времени уделял исследованиям электроприводов переменного тока, в частности улучшению их энергетических показателей и путей их достижения. Он разработал теорию выбора маховичного привода для механизмов, работающих с ударной нагрузкой, изобрел оригинальный электровинтовой пресс, предложил методику расчета систем электрического вала.

Особый интерес представляет его монография «Дополнительные главы теории электропривода», изданная в 1936 г., в которой были представлены оригинальные разработки и расчеты электрических приводов переменного тока. Эта работа в свое время оказала большую помощь не только студентам, но и специалистам-производственникам. Кроме этого, широко известны две его монографии по электроприводу кузнечно-прессовых машин.

Вышедшее вторым изданием в 1959 г. фундаментальное учебное пособие А.Т.Голована «Основы электропривода» является и сейчас настольной книгой студентов, научных работников, инженеров и представляет значительный интерес.

Профессор А.Т.Голован вел большую преподавательскую работу. Он руководил аспирантами, стажерами, читал лекции, был членом экспертной комиссии ВАК. Им подготовлено свыше 30 докторов и кандидатов технических наук.

Д.П.Морозов и А.Т.Голован подготовили целую плеяду последователей и учеников, многие из которых стали впоследствии основателями научных школ, видными учеными, руководящими работниками промышленности и НИИ. Это профессора Н.Ф.Ильинский, А.А.Сиротин, А.С.Сандлер, В.И.Ключев, Г.В.Грабовецкий и др.

Одним из них был крупный ученый и организатор науки профессор Михаил Григорьевич Чиликин. В 1935 г. он, будучи студентом первого выпуска кафедры, поступает в аспирантуру, после окончания которой работает доцентом, начальником учебного управления института. В это время ему приходится решать много вопросов по перестройке высшего технического образования в стране.

В годы войны М.Г.Чиликин работает директором одного из оборонных заводов Москвы, а в мирное время возвращается к научно-педагогической деятельности, защищает докторскую диссертацию в 1954 г., становится ректором института и заведующим кафедрой, которую он возглавлял до 1977 г.

Многогранна научная деятельность профессора М.Г. Чиликина. Им и его учениками выполнены работы в области электрогидравлического привода, электроприводов с магнитными усилителями и вентильными преобразователями. Много лет он посвятил становлению и развитию новой научной школы — шаговому электроприво-



М.Г.Чиликин



А.С.Сандлер

ду. Результатом явились разработка и создание дискретных электроприводов с шаговыми двигателями, нашедшими широкое применение в машиностроении, особенно в станках с числовым программным управлением, в металлургии и многих других отраслях техники. В 1960 г. он стал Заслуженным деятелем науки и техники РСФСР, а за цикл работ по дискретному электроприводу с шаго-

выми двигателями ему в 1967 г. было присвоено звание Лауреата Государственной премии СССР.

Из почти 300 книг и статей, опубликованных М.Г.Чиликиным лично и в соавторстве, следует отметить монографию «Дискретный электропривод с шаговыми двигателями», выдержавший шесть изданий и переведенный на многие языки мира учебник «Общий курс электропривода», а также неоднократно переиздававшийся многотомный электротехнический справочник, бессменным главным редактором которого он был. Им подготовлено несколько докторов и более 20 кандидатов технических наук.

Михаил Григорьевич обладал огромным организаторским талантом, обостренным чувством нового, незаурядными человеческими качествами. Наряду с большой научной деятельностью он много сил и энергии вложил в развитие высшей школы страны, а также в налаживание международных межвузовских связей. Его работа в этих областях была неоднократно отмечена присуждением орденов и медалей нашей страны, а также ГДР и НРБ. Ему были присвоены Почетные звания доктора наук высшей школы г.Ильминау (ГДР) и Будапештского технологического университета. Среди учеников М.Г.Чиликина можно отметить профессоров Б.А.Ивоботенко, В.И.Ключева, А.А.Аракеяна.

Достоинным продолжателем научной школы электропривода стал также профессор Абрам Соломонович Сандлер. С 1937 г. его жизнь связана с МЭИ, где он окончил аспирантуру, защитил кандидатскую, а в 1962 г. и докторскую диссертации.

А.С.Сандлер внес большой вклад в теорию и практику автоматизированного электропривода переменного тока. Причем наибольшее внимание уделялось вопросам пуска, точного и фиксированного останова двигателей переменного тока, теоретическим основам двухдвигательного асинхронного привода с поворотным статором и вентильно-машинным каскадам.

Значительным достижением профессора А.С. Сандлера были работы в области частотно-регулируемого электропривода. Возглавив группу молодых ученых, таких как Р.С.Сарбатов, А.В.Кудрявцев, Ю.М.Гусяцкий, он создал новое научное направление, приоритетность которого не вызывает сомнения и в настоящее время.

А.С.Сандлер опубликовал более 100 научных

трудов, среди которых монография «Регулирование скорости вращения мощных асинхронных двигателей», а также до сих пор пользующийся большой популярностью учебник «Электропривод и автоматизация металлорежущих станков». Широко известны ставшие настольными книгами работы А.С.Сандлера и его учеников: «Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями», «Преобразователи частоты на тиристорах для управления высокоскоростными двигателями» и др.

Многогранна педагогическая деятельность профессора А.С.Сандлера. Он являлся лектором по курсу «Электропривод и автоматизация металлорежущих станков», был членом НТО, лектором Всесоюзного общества «Знание». Более 20 его аспирантов защитили кандидатские диссертации.

Имя профессора Артемия Афанасьевича Сиротина известно в широких кругах в нашей стране и за рубежом. Один из учеников А.Т.Голована, он в 1938 г. начал свою научную деятельность на кафедре сразу после окончания МЭИ. В годы войны трудился на оборонных предприятиях, а в мирное время возобновил работу в вузе, где в 1952 г. защитил кандидатскую диссертацию и приступил к чтению лекций и руководству одним из основных курсов кафедры «Автоматическое управление электроприводами». Много времени и сил отдавал он улучшению методики преподавания курса, развитию лаборатории и совершенствованию учебного процесса. Одновременно А.А.Сиротин плодотворно участвовал в работе научно-методической Комиссии Минвуза СССР, разрабатывал программу курса «Автоматическое управление электроприводами» для вузов страны.

С 1961 г. в течение двух лет он с успехом работал в Индии, в Бомбейском технологическом институте профессором и экспертом ЮНЕСКО, где читал несколько курсов на английском языке.

А.А.Сиротин сочетал преподавательскую и методическую работы с большой научно-исследовательской деятельностью в области дискретных систем автоматического управления электроприводами, оптимальных систем автоматического управления, включающих упругие звенья, и нелинейной теории систем автоматического управления. По результатам этих работ им была защищена докторская диссертация в 1970 г.

За создание и внедрение в промышленность элементов и систем дискретного привода с шаговыми двигателями А.А.Сиротину в 1967 г. присуждена Государственная Премия СССР, а в 1977 г. присвоено почетное звание «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР».

В настоящее время научная школа профессора А.А. Сиротина успешно развивается в работах



А.А.Сиротин



М.М.Соколов

его соратников и последователей, таких как профессор Б.А. Ивоботенко, профессор В.М. Терехов и др.

Известным ученым в области автоматизированного электропривода был профессор Михаил Михайлович Соколов. Свою научную карьеру он начал сразу после окончания МЭИ в 1943 г., в 1947 г. защитил кандидатскую, а в 1962 г. докторскую диссертации.

Научные интересы М.М.Соколова представляли большой спектр проблем регулируемого электропривода переменного тока, где он создал свою научную школу. Его работы обогатили науку теоретическими исследованиями электромагнитных переходных процессов в асинхронных электроприводах, решением вопросов измерения динамических моментов, а также разработкой теории таких «экзотических» в то время приводов, как электроприводы с линейными двигателями.

Профессор М.М. Соколов разработал теорию асинхронного электропривода с параметрическим регулированием, одним из первых занимался изучением и созданием электроприводов переменного тока с тиристорным управлением, многие из которых были внедрены в производство. Хорошо известны его труды по электроприводам с импульсным управлением в цепи выпрямленного тока ротора и асинхронным электроприводам с дросселями насыщения.

Не менее объемна и педагогическая деятельность М.М.Соколова. Он лектор по курсу основ электропривода, автор около 300 научных работ, 50 из которых являются авторскими свидетельствами на изобретения. Им написано несколько учебников и учебных пособий, по которым обучалось не одно поколение студентов, подготовлен большой отряд высококвалифицированных инженерных и научных кадров. Среди них профессора Л.Б.Масандилов, А.О.Горнов, В.В.Москаленко. Ему присвоено звание Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР. М.М.Соколов был активным, трудолюбивым, жизнерадостным и целеустремленным человеком.

Профессор Василий Павлович Бычков, также как и М.Г.Чиликин, был студентом первого выпуска кафедры в 1935 г. В 1940 г. он защитил канди-

датскую диссертацию и стал преподавателем, а летом 1941 г., как многие студенты и преподаватели МЭИ, вступил в ряды Народного Ополчения, участвовал в тяжелых боях под Москвой, а после демобилизации в 1943 г. вернулся к преподавательской деятельности.

В.П.Бычков был учеником Д.П.Морозова и после его смерти возглавил научную группу металлургического электропривода, которая на протяжении многих лет вносила большой вклад в подготовку высококлассных кадров для народного хозяйства страны и в решение многих важных вопросов теории и практики металлургического производства. Результаты выполненных под его руководством работ использовались на мощных прокатных станах Магнитогорского, Челябинского и Карагандинского металлургических заводов.

Успешно В.П.Бычков занимался преподавательской деятельностью. Им написано одно из первых учебных пособий по металлургическому электроприводу «Электропривод и автоматизация металлургических предприятий», дважды издававшееся в нашей стране. Подготовлено более двух десятков аспирантов, в том числе и зарубежных. Среди его учеников можно отметить профессора Ю.С.Усынина, доц. М.Г. Бычкова.

Основателям научно-педагогической школы автоматизированного электропривода удалось создать на кафедре большой и сплоченный коллектив единомышленников и последователей, верных приводческим традициям. К этим традициям относятся высокий научно-педагогический потенциал кафедры, стремление концентрировать усилия на приоритетных направлениях развития техники, успешное преодоление трудностей, постоянная и творческая работа с молодежью. Характерным в работе является тесная связь с производством и отраслевыми НИИ, зарубежными фирмами и университетами, широкий фронт проводимых исследований и разработок, плодотворное участие в них студентов и аспирантов, а также большая и бескорыстная помощь, постоянно оказываемая сотрудниками кафедры всем в ней нуждающимся.



В.П.Бычков

Учебный процесс на кафедре автоматизированного электропривода МЭИ

МОСКАЛЕНКО В.В.

Совершенствование учебного процесса с целью повышения качества выпускаемых специалистов всегда было и остается главной задачей коллектива кафедры АЭП.

Обучение специалистов на кафедре АЭП ведется в рамках многоступенчатой системы образования, предусматривающей подготовку и выпуск бакалавров, инженеров и магистров. Бакалавриат го-

товит специалистов с фундаментальным образованием по направлению 551.300 “Электротехника, электромеханика и электротехнологии” и определённой специализацией в области электропривода в относительно короткий срок — 4 года. Такое образование может заинтересовать тех, кто после окончания вуза видит себя работающим в сфере наладки и эксплуатации электрооборудования, оператором сложных электромеханических систем, техническим руководителем небольшого предприятия, специалистом по менеджменту или маркетингу в сфере производства и распределения электротехнической продукции.

Инженеры (срок обучения 5,5 лет) получают более глубокую и целенаправленную подготовку по специальности, которая позволяет им заниматься исследованием, проектированием и конструированием электроприводов, систем промышленной автоматизации и их компонентов, работать в качестве наладчиков сложных комплексов электрооборудования.

В магистратуре (срок обучения 6 лет) обучаются студенты, имеющие склонность к научным исследованиям и соответствующие для этого способности. Они обучаются по индивидуальным учебным планам, предусматривающим углублённую физико-математическую и компьютерную подготовку, изучение современных методов и средств управления, применяемых в электроприводах. Половина их учебного времени отводится на выполнение научных исследований, результаты которых представляются в виде магистерской диссертации. Большинство магистров продолжают своё обучение в аспирантуре кафедры, имея для этого хороший задел.

В действующих учебных планах и программах подготовки специалистов кафедра в максимальной степени старалась сохранить и использовать лучшие традиции и многолетний положительный опыт школы электропривода, основы которой заложены профессорами А.Т.Голованом, Д.П.Морозовым, М.Г.Чиликиным, А.С.Сандлером, А.А.Сиротиним, М.М.Соколовым, В.П.Бычковым и многими другими. В то же время в программах профилирующих курсов — “Теория электропривода”, “Системы управления электропривода” и в базирующихся на них курсах “Электропривод типовых механизмов”, “Типовые решения в технике электропривода”, “Автоматизация технологических процессов” и ряде других нашли своё отражение и перспективы развития современного электропривода: применение новых методов и средств управления, в первую очередь микропроцессорных, развитие регулируемого электропривода переменного тока, повышение требований к надёжности функционирования электроприводов, их энергетическим показателям работы и возможностям энергосбережения.

Особенную значимость в современных условиях приобрела компьютерная подготовка выпускников, для обеспечения должного уровня которой в

учебных планах специалистов реализован непрерывный — с первого семестра и до окончания института — цикл обучения выпускников методам компьютерных технологий и микропроцессорного управления и аппаратным средствам их реализации. Для формирования у выпускников практических навыков использования современных микропроцессорных средств управления на кафедре созданы Учебно-научные консультационные центры фирм “Texas Instruments” и “Motorola”.

Продолжая и совершенствуя традиционный профиль подготовки выпускников, кафедра в последние годы усилила и их конструкторскую подготовку в рамках курсов “Проектирование электротехнических устройств” и “Дизайн и техническая эстетика”. Возможная деятельность выпускников в сфере реализации подкреплена дисциплиной “Квалиметрия и маркетинг электротехнической продукции”, а в сфере эксплуатации — курсом “Монтаж, наладка, эксплуатация и диагностика электроприводов”.

Проблемы управления энергохозяйством предприятий и организаций и рациональной его эксплуатации в настоящее время приобрели весьма острый характер. Изношенность оборудования, необходимость его модернизации на базе современной техники, постоянно растущая стоимость энергоносителей и связанные с этим задачи энергосбережения, несовершенство нормативно-правовой базы во взаимоотношениях производителей и потребителей энергии настоятельно потребовали подготовки специалистов нового профиля — энергоменеджеров, способных решать эти и другие непростые задачи. Необходимость этого почувствовали многие учебные заведения России, начавшие подготовку и переподготовку специалистов по энергетическому менеджменту. На факультете электрооборудования и автоматизации промышленности и транспорта в 1998 г. была введена общефакультетская специализация для инженеров “Менеджмент в энергохозяйстве”, студенты которой получают соответствующую подготовку за счёт часов дисциплин, утверждаемых Учёным советом. Среди них — “Энергосилое хозяйство предприятий”, “Энергоаудит”, “Технические методы и средства энергосбережения”, “Менеджмент в энергохозяйстве”, “Нормативная база энергоснабжения”.

Существенно, что объектами изучения названных дисциплин являются как электрическое, так и тепловое хозяйства предприятий. По этому же направлению на кафедре осуществляется и переподготовка специалистов, проводимая в рамках Центра “Менеджмент в энергохозяйстве”, в котором уже повысили свою квалификацию несколько десятков работников служб главных энергетиков и административных органов из многих регионов России.

Развитие лабораторной базы кафедры шло по двум основным направлениям. Первое из них предусматривало расширение представительства в

учебных лабораториях регулируемых электроприводов переменного тока с использованием серийных преобразователей частоты и тиристорных регуляторов напряжения как отечественных, так и ведущих зарубежных фирм — “Siemens”, ABB, “Allen-Bradley”, “Emotron” и др. Второе направление связано с развитием лабораторной базы по микропроцессорным средствам управления, в том числе системам управления с программируемыми контроллерами.

Традиционно большое внимание кафедра уделяет и методическому обеспечению учебного процесса. В последние годы вышли в свет фундаментальный учебник профессора В.И.Ключева “Теория электропривода” (2-е издание), учебное пособие профессора Л.Б.Масандилова “Электропривод подъёмных кранов”, масштабный труд доцента В.Ф. Козаченко по микропроцессорной технике. Готовятся к изданию новые учебные пособия по дисципли-

нам “Основы электропривода” (общий курс), “Проектирование электротехнических устройств” и ряд других.

Разумом, творческой инициативой и трудом нескольких поколений работников кафедры АЭП продолжает развиваться школа электропривода, подготовившая тысячи высококвалифицированных специалистов, успешно работающих в самых разных организациях и в различных качествах. Вместе с тем быстро развивающийся автоматизированный электропривод требует дальнейшего совершенствования учебного процесса с тем, чтобы выпускники кафедры соответствовали современным требованиям к техническим специалистам — электромеханикам. И нет никаких сомнений в том, что высококвалифицированный, работоспособный и сплочённый коллектив кафедры автоматизированного электропривода МЭИ справится с этими задачами.

Асинхронный частотно-регулируемый электропривод в учебных лабораториях кафедры автоматизированного электропривода МЭИ

ОСИПОВ О.И.

Рассмотрен опыт применения полупроводниковых преобразователей частоты со звеном постоянного тока различных фирм-изготовителей в лабораторном практикуме, связанном с исследованием асинхронного частотно-регулируемого электропривода.

Тенденция расширенного применения регулируемого асинхронного электропривода на основе полупроводниковых преобразователей частоты (систем ПЧ-АД) требует более глубокого их изучения при подготовке и переподготовке инженерных кадров. Без высокого уровня технического и методического обеспечения лабораторного практикума учебных заведений решение этой задачи подобно заочному обучению боксу. Между тем, даже наиболее оснащенные лаборатории учебных заведений России не имеют полного технического набора систем ПЧ-АД с различными принципами построения как силовой части (преобразователей с явно выраженным звеном постоянного тока, с непосредственной связью), так и систем управления преобразователями (разомкнутых, замкнутых, со скалярным, векторным, аналоговым, цифровым управлением).

В учебных лабораториях кафедры автоматизированного электропривода МЭИ за счет тесных связей с фирмами-изготовителями установлен и используется в учебном процессе ряд преобразователей частоты, краткие технические характеристики которых представлены в таблице.

Все преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока и автономным инвертором на IGBT транзисторах. Линейное напряжение питания

преобразователей 380 В частотой 50 Гц. Номинальные мощности $P_{ном}$ и токи нагрузок $I_{ном}$ преобразователей соответствуют ряду номинальных мощностей (1—3 кВт) и токов статорных цепей асинхронных двигателей с короткозамкнутым или фазным ротором, применяемых в качестве исследуемых в большинстве учебных лабораторий. Выходное линейное напряжение преобразователей регулируется от нуля до 380 В с частотой от нуля до 200 Гц и более.

Преобразователи имеют алфавитно-цифровой дисплей панели управления с программируемыми прикладными макропрограммами, обеспечивающими простым нажатием на клавиши панели управление и визуальный контроль входных и выходных значений переменных регулируемого электропривода. В клетках таблицы знаком “+” отмечены контролируемые для каждого из типов преобразователей значения выходных переменных электропривода (линейного напряжения U_s и тока I_s нагрузки преобразователя, угловой скорости двигателя ω , электромагнитного момента M , мощности P и энергии W , потребляемой двигателем, выходного напряжения звена постоянного тока U_d , температуры радиаторов полупроводниковых ключей инвертора T). Пустые клетки таблицы указывают на отсутствие в дан-

ном типе преобразователя вывода информации о соответствующей переменной электропривода.

Функциональные, структурные и программные решения преобразователей могут обеспечивать регулирование частоты вращения вала двигателя в разомкнутой и замкнутой системах управления, с IR-компенсацией падения напряжения в сопротивлении статорной цепи двигателя или с регулированием скольжения ($\omega + s$), с регулированием лишь момента (M) или регулированием момента и скорости ($M + \omega$). Знаком "x" в таблице указана возможность программного обеспечения в соответствующих преобразователях рассмотренных режимов работы электропривода.

Унифицированный лабораторный стенд, включающий в себя один из представленных в таблице преобразователь частоты, асинхронный двигатель с фазным ротором, нагрузочное устройство с регулируемым активным моментом сил сопротивления и датчиком скорости полностью обеспечивают сквозной и взаимосвязанный практикумы по учебным курсам "Элементы автоматизированного электропривода", "Теория электропривода", "Системы управления электроприводов", "Типовые решения и техника современного электропривода" специальности 180400, практикум по общему курсу электропривода в смежных электротехнических специальностях, а также выполнение научно-исследовательских работ в области электромеханики и автоматизации технологических процессов. Базовыми являются исследования и анализ статических регулировочных, механических, электромеханических, энергетических и динамических характеристик отдельных элементов электропривода, а также разомкнутой и замкнутой систем ПЧ- АД при вариациях параметров и структур их систем управления.

На рис. 1, 2 представлены фрагменты экспериментальных механических характеристик системы ПЧ-АД

на базе преобразователя Simover 6SE7016 -1EA20 (см. таблицу) и асинхронного двигателя типа MTF 011-6 ($P_{ном} = 1,4$ кВт, $\omega_{ном} = 92,7$ рад/с). Характеристики снимались при работе преобразователя в режиме векторного управления электромагнитным полем двигателя в замкнутой системе регулирования его скорости (рис.1) и момента (рис.2)¹. Численные значения угловой скорости ω (рад/с) и электромагнитного момента (в процентах от номинального значения момента $M_{ном}$) двигателя фиксировались по дисплею пульта управления преобразователем.

Техническая реализация лабораторных стендов на основе представленных преобразователей частоты, а также опыт проведения на них лабораторных работ позволяют отметить ряд технических и связанных с ними методических особенностей и проблем применения подобных преобразователей в учебном процессе.

Установка и подключение преобразователей на новых или действующих лабораторных стендах из-за их малых масс (не более 9 кг) и габаритов (в пределах 150×425×350 мм), а также настройка и пуск преобразователей в эксплуатацию не представляют особых проблем.

Каждый из преобразователей имеет программный ввод номинальных данных и основных параметров подключаемого к нему электродвигателя, ограничение переменных электропривода (минимальных и максимальных частот, действующих значений выходного напряжения преобразователя, максимально допустимых выходных токов преобразователя и т.п.), а также темпов увеличения и уменьшения частоты выходного напряжения преобразователя. Предварительная их настройка и программ-

¹ Экспериментальные исследования выполнены студентами гр. ЭЛ-1-95 Д.А.Орловым и В.В.Поздняковым

Технические характеристики преобразователей частоты

Фирма-изготовитель	ABB	«Allen-Bradley»	«Danfoss»	«Emotron»	«Hita-chi»	«Omron»	«Siemens»
Тип	ACS 501004-3	CAT-1331	VLT-3004	Vectorflux HF	J300-055	3G31V-A4037	Simover 6SE7016-1EA20
$P_{ном}$, кВт	2,2	1,9	2,2	2,2	5,5	3,7	3,2
$I_{ном}$, А	6,2	4,5	5,5	5,5	19	8	6,1
f_s , Гц	+	+	+	+	+	+	+
U_s , В	+	+	+	+	+	+	+
I_s , А	+	+	+	+	+	+	+
ω , рад/с	+			+	+		+
M , н·М	+		+	+			+
P , кВт	+	+	+	+		+	+
W , кВт·ч	+		+	+			+
U_d , В	+	+	+	+		+	+
T , °С	+	+	+	+			+
ω	x	x	x	x	x	x	x
$\omega + s$	x		x	x			x
ω				x	x		x
M				x	x		x
$M + \omega$				x	x		x

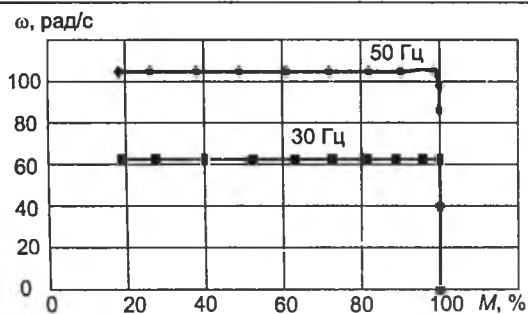


Рис.1.

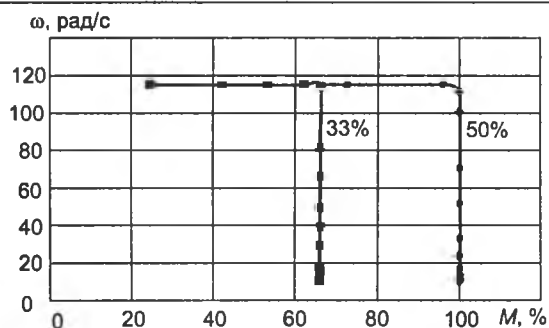


Рис.2.

ный запрет возможных в процессе лабораторных исследований вмешательств в эту настройку существенно повышают безопасность исследований и эксплуатационную надежность преобразователя. Способствует этому и встроенная самодиагностика преобразователей, позволяющая также судить об ошибках в действиях исследователя.

При равных выходных технических характеристиках для лабораторного практикума предпочтительны преобразователи, имеющие:

1. Не менее трех различных каналов управления — внешнего аналогового, посредством клавиатуры встроенного пульта управления, через последовательный интерфейс. Подобное сочетание позволяет легко менять уровень и насыщенность программ лабораторных занятий по различным учебным курсам в зависимости от задач и степени подготовки обучающегося. Так, на младших курсах целесообразно управление преобразователем от внешнего аналогового сигнала, на более старших — от клавиатуры пульта управления или внешнего персонального компьютера.

2. Наибольшее число отображаемых на дисплее текущих переменных электропривода. При этом не только сокращается число дополнительных и технически сложных измерительных приборов в лабораторной установке (например, датчиков мощности или электромагнитного момента двигателя), но и расширяются методические возможности лабораторного практикума, поскольку анализируется большее число функциональных зависимостей между переменными электропривода.

3. Наибольшее число регулируемых переменных (частоты, напряжения, скорости, момента), а также вариантов структурных изменений и параметров регуляторов систем управления электропривода (разомкнутых и замкнутых систем, с компенсацией скольжения и без нее, с обратными связями по модели двигателя или внешним аналоговым или цифровым датчикам, скалярным или векторным управлением). При этом появляется возможность исследований и анализа не только статических, но и динамических свойств частотно-регулируемого электропривода при различных структурах и параметрах регуляторов. Последнее в наибольшей мере отвечает задачам курса «Си-

стемы управления электроприводов».

4. Возможность управления преобразователем со стороны внешнего персонального компьютера с отображением на его дисплее не только структуры преобразователя и его текущих переменных, но и с графическим изображением выбранных зависимостей между ними. При этом увеличивается наглядность и сокращаются ошибки в управлении электроприводом, резко снижается время экспериментальных исследований и записи их результатов. В итоге возможен рост объема исследований.

Из числа приведенных в таблице преобразователей частоты наиболее полно рассмотренным требованиям соответствует преобразователь типа Simovert 6SE7016-1EA20. Установленные версии преобразователей типа VLT-3004 и Vectorflux HF не могут настраиваться и работать через последовательный интерфейс. Преобразователи типа J300-055 и 3G31V-A4037 требуют прикладных плат для реализации внешних регуляторов переменных электропривода.

Общим и весьма существенным недостатком установленных в лабораториях преобразователей является отсутствие в них встроенных управляемых блоков рекуперации энергии в сеть. Это резко ограничило диапазон исследуемых режимов работы частотно-регулируемого электропривода, поскольку исчезла возможность исследований в режимах рекуперативного торможения асинхронного двигателя.

Насыщенность лабораторий преобразователями частоты позволила кафедре автоматизированного электропривода МЭИ не только обеспечить полный цикл лабораторных работ по исследованию частотно-регулируемого асинхронного электропривода на различных учебных курсах, но и совместно с фирмами — изготовителями преобразователей организовать курсы повышения квалификации и переподготовки инженерных кадров промышленных предприятий, а также предоставление им инжиниринговых услуг в сфере освоения новой преобразовательной техники. Подобные теоретические курсы (по месту расположения предприятия) и лабораторный практикум по освоению преобразователей фирмы «Siemens» прошли в лабораториях кафедры, например, инженерно-технические работники Орско-Халиловского меткомбината.

Новые образовательные технологии при подготовке специалистов в области разработки цифровых систем встроенного управления двигателями

КОЗАЧЕНКО В.Ф.

Рассмотрены особенности образовательных технологий в области обучения специалистов современным методам проектирования, отладки и сопровождения систем прямого цифрового управления двигателями различных типов на основе специализированных сигнальных микроконтроллеров фирмы «Texas Instruments».

Для реализации современных технологий при подготовке специалистов в области цифровых систем управления двигателями в МЭИ был создан Учебно-научно-консультационный центр фирмы «Texas Instruments». Центр был открыт 3 февраля 1999г. во время проведения в МЭИ Научно-практического семинара «Микроконтроллеры в электроприводе. Перспективные серии микроконтроллеров для систем прямого цифрового управления двигателями». Семинар проводился при поддержке официальных дистрибьюторов в России фирм «Motorola», «Texas Instruments», «Analog Devices», «Siemens», «International Rectifier», а также журнала «SHIP NEWS».

Основная задача центра — обучение студентов и специалистов промышленности на базе сигнальных микропроцессоров и специализированных микроконтроллеров самым современным технологиям проектирования и отладки систем прямого микропроцессорного управления двигателями различных типов: постоянного тока, асинхронными, синхронными, шаговыми, вентильными и вентильно-индукторными. При создании центра ставилась задача обеспечения на базе лаборатории микропроцессорных систем управления кафедры АЭП МЭИ научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по заказам отечественных предприятий и западных фирм в области систем управления приводами.

В качестве долговременного партнера была выбрана фирма «Texas Instruments». Эта фирма специализируется на производстве компонент для систем управления реального времени. «Texas Instruments», являясь четвертой компанией в мире по объему производства электроники, занимает первое место в мире по производству цифровых сигнальных процессоров (лидерами в этой области являются «Texas Instruments», «Lucent», «Motorola», «Analog Devices»). Заслуги компании «Texas Instruments» в электронике общеизвестны: первая интегральная схема, первый калькулятор, первый сигнальный процессор, первый сигнальный процессор с флэш-памятью на кристалле. «Texas Instruments» — признанный лидер в области цифровой обработки сигналов и аналого-цифровой техники. Сегодня сфера применения сигнальных процессо-

ров из области систем связи, цифровой обработки звука и изображений, военных применений все в большей мере смещается в область общепромышленных применений, в частности, в область систем эффективного цифрового управления двигателями.

При разработке современных цифровых систем встроенного управления двигателями необходимо учитывать ряд факторов:

1. Резко возросшие в течение последних 4—5 лет требования к электроприводе по диапазону регулирования скорости и момента, функциональным возможностям, надежности и стоимости заставили разработчиков перейти к более сложным алгоритмам векторного и бездатчикового управления; к самонастраивающимся системам с идентификацией параметров исполнительного двигателя и нагрузки; другим сложным системам, требующим значительных вычислительных ресурсов центрального процессора. Сигнальные микропроцессоры, в отличие от обычных процессоров, имеющих классическую Фон-Неймановскую архитектуру, строятся с использованием более производительной модифицированной Гарвардской архитектуры. Выигрыш в производительности на один или даже несколько порядков достигается за счет многошинной структуры с одновременным доступом сразу к нескольким областям памяти, а также за счет использования системы команд, оптимизированной к решению задач обработки данных в реальном времени.

2. Применительно к электромеханике речь идет о встроенных системах, например, о платах контроллеров, которые конструктивно интегрированы в оборудование и предназначены для непосредственного управления всеми элементами этого оборудования в реальном масштабе времени. Так, в преобразователях частоты для регулирования скорости асинхронных двигателей контроллер должен формировать сигналы управления силовыми ключами инвертора и входного преобразователя, принимать информацию с датчиков токов, напряжений, температуры двигателя и инвертора и т.д., обеспечивать связь с системой управления более высокого уровня, а также с человеком—оператором. Главная особенность систем реального времени — обработка большого числа внешних сигналов по

прерываниям и предельно малое время, отводимое на реализацию собственно алгоритмов управления. Часто базовый алгоритм должен быть реализован на периоде управляющего ШИМ-сигнала. При частоте, несущей 20 кГц, это время составляет всего лишь 50 мкс. Для реализации базового алгоритма требуется 1000 команд процессора. Это означает, что каждая команда должна выполняться за 50 нс, т.е. процессор должен иметь производительность не менее 20 млн. операций в секунду. Такую высокую производительность как раз и имеют сигнальные процессоры.

3. Существует определенная специфика при управлении в реальном времени двигателями, в отличие, например, от систем реального времени в телекоммуникационной технике и связи. Эта сфера применения характеризуется чрезвычайным разнообразием входных и выходных сигналов. Необходимо организовать не только выдачу управляющих сигналов, как правило, регулируемой частоты и скважности на ключи силового преобразователя, но и обеспечить ввод сигналов обратных связей с датчиков механических координат привода (например, импульсных датчиков положения), ввод значительного числа аналоговых, импульсных и потенциальных сигналов. Целесообразно, чтобы эти операции выполнялись с помощью специальных периферийных устройств, интегрированных на кристалл микроконтроллера и работающих автономно от центрального процессора: многоканальных генераторов широтно-импульсных сигналов, менеджеров событий, аналого-цифровых преобразователей, квадратурных декодеров и т.д. Это позволяет минимизировать аппаратные затраты, габариты и стоимость системы управления, разгрузить центральный процессор для реализации базовых алгоритмов управления. Область систем цифрового управления двигателями характеризуется наиболее широким спектром встроенных периферийных устройств. Сегодня эти изделия выделились даже в специальный класс — микроконтроллеры для эффективного управления двигателями.

4. В последние несколько лет в связи с колоссальными успехами в силовой электронике, особенно в сфере создания силовых ключей с интегрированными защитными функциями (самозащищенных ключей) и силовых интеллектуальных модулей на транзисторах с изолированным затвором (IGBT), резко возросла потребность в создании специализированных микроконтроллеров, оптимизированных для управления новыми силовыми компонентами. Начал складываться особый сегмент рынка — рынок управляющих устройств, ориентированных на эффективное управление двигателями и инверторами. Серии таких микроконтроллеров стали выпускаться ведущими фирмами и получили название motor control (микроконтроллеры для управления двигателями). У истоков стояли «Intel», «Motorola»

и «Siemens», которые выпускали и продолжают выпускать такие устройства. Как уже упоминалось, производители сигнальных процессоров, прежде всего «Texas Instruments» и «Analog Devices», по достоинству оценили емкость нового рынка и предложили потребителям более производительный класс устройств — сигнальные микроконтроллеры управления двигателями с широким спектром встроенных периферийных устройств.

5. По оценкам специалистов потребности в изделиях типа motor control огромны. Сегодня в мире эксплуатируются примерно 14 млрд. электрических двигателей. Для сравнения — все население земли составляет 6 млрд. человек. Оказывается, на каждый используемый телефон приходится более 30 двигателей. По самым скромным подсчетам десятая часть всех приводов должна быть регулируемой, что составляет не менее полутора миллиардов штук. В класс регулируемых приводов попадают приводы периферийных устройств персональных компьютеров (принтеров, плоттеров и т.д.), бытовой техники (холодильников, стиральных машин, кондиционеров и т.д.), станков, роботов, автоматических линий, подъемно-транспортной техники и т.д. Столь внушительный объем рынка заставляет постоянно совершенствовать и удешевлять изделия типа motor control. Номенклатура микроконтроллеров этого типа, а также микросхем окружения, постоянно расширяется и составляет уже несколько десятков штук. Ведущие производители, например, «Texas Instruments» и «Analog Devices», ежегодно выпускают на рынок до 5 новых моделей микроконтроллеров.

В изделиях этого класса motor control удачно сочетается высокая производительность, богатство функциональных возможностей и низкая цена, которая требуется для использования сигнальных микроконтроллеров в изделиях массового спроса. Существует даже определенный численный критерий, по которому потенциальные потребители процессорной техники могут оценить ее эффективность — число миллионов операций в секунду за один доллар стоимости. По этому показателю фирма «Texas Instruments» — лидер. Так, при объеме заказа не менее 100000 штук стоимость сигнальных микроконтроллеров управления двигателями TMS320C240 с производительностью 20 млн. операций в секунду составляет 7,5 дол., а микроконтроллеров C242 — 3,8 дол. Разработаны и появились на рынке сверхдешевые малопотребляющие микроконтроллеры с производительностью 30 млн. операций в секунду TMS320LC2402 по цене 2,5 дол. В 2000 г. ожидается появление микроконтроллеров с производительностью уже 100 млн. операций в секунду. Значительные успехи в технологии изготовления БИС привели к тому, что стоимость высокопроизводительного сигнального микроконтроллера почти сравнялась со стоимостью обычного микроконтроллера.

Как для уникальных и сложных приводов, например, приводов телескопов или систем наведения, так и для приводов изделий массового спроса, например, стиральных машин и холодильников, сегодня пришло время разрабатывать и внедрять системы управления на базе сигнальных микроконтроллеров. Оценки показывают, что общая стоимость такой системы управления по сравнению с системой управления на базе обычных микроконтроллеров или специализированных заказных БИС оказывается даже на 10—40% ниже. Эффект достигается, в том числе, за счет перехода на более перспективные алгоритмы бездатчикового управления и отказа от дорогостоящих измерительных систем. Немаловажное значение имеет и чрезвычайно высокая гибкость систем управления на сигнальных микроконтроллерах с флэш-памятью, что позволяет эффективно работать в области мелкосерийного и даже единичного производства.

Наш опыт разработки систем управления для отечественных преобразователей частоты показывает, что наиболее длительным оказывается именно процесс разработки и отладки программного обеспечения. При этом поистине уникальной является возможность перепрограммировать систему управления непосредственно в изделии, просто подключив к нему портативный компьютер (через интерфейс RS-232). В этом случае не нужен даже программатор, а его функции с успехом может выполнять центральный процессор микроконтроллера. Казавшаяся ранее фантастической мысль перепрограммировать систему управления по компьютерной сети, в том числе через Internet, становится реальностью. Новые возможности микроконтроллеров позволяют изготавливать приводы на заказ, удовлетворяя потребности конечных пользователей путем оперативной модификации базового программного обеспечения.

Более подробную информацию о составе имеющейся серии изделий и о новейших разработках фирмы «Texas Instruments» в этой области можно получить в сети Internet. На сайте фирмы по адресу <http://www.ti.com> можно найти справочные материалы, электронные руководства по использованию микросхем, примеры применений и образцы программных модулей для решения типовых задач. Советуем обратиться также на сайт Учебно-научно-консультационного центра «Texas Instruments-МЭИ» по адресу <http://www.ti.mpei.ac.ru>, где можно ознакомиться с оборудованием центра, найти ряд справочных материалов на русском языке, а также подробную программу обучения специалистов с перечнем всех лекционных и лабораторно-практических занятий. Можно скопировать подробное описание комплекта программно-аппаратных средств МСК240, используемого при обучении студентов и специалистов, и оценить возможности, ко-

торые предоставляются проектировщику современных систем цифрового управления двигателями.

На кафедре ведутся разработки систем встроенного управления двигателями с использованием микроконтроллеров различных фирм, прежде всего «Intel», «Texas Instruments», «Analog Devices», «Motorola», «Siemens». Для каждого конкретного применения выбор типа микроконтроллера производится, исходя из подробного анализа технических требований. Микроконтроллеры «Texas Instruments» имеют, на наш взгляд, следующие преимущества:

1. Наличие флэш-памяти программ с возможностью перепрограммирования непосредственно в изделии по последовательному синхронному или асинхронному каналу связи. Высокая надежность и сохранность программного кода, особенно в условиях промышленной эксплуатации. Встроенная система защиты программного кода от стирания и перепрограммирования.

2. Интегрированный на кристалл CAN-контроллер (контроллер локальной распределенной сети микроконтроллеров) с аппаратной поддержкой протокола 2,0 В, что резко ускоряет разработку взаимосвязанных систем привода в станкостроении, робототехнике и гибком автоматизированном производстве.

3. Наличие в перспективных моделях микроконтроллеров сдвоенного менеджера событий, что позволяет от одного контроллера управлять двухдвигательными и двухинверторными системами. Это особенно важно в приводах, работающих с рекуперацией энергии торможения (лифты, подъемники, шахтные механизмы, транспорт), а также в сложных системах, где первостепенное значение имеют проблемы компенсации упругих колебаний и мягкого выбора зазоров.

4. Эффективная система генерации ШИМ-сигналов для прямого цифрового управления инверторами напряжения — поддержка метода так называемой векторной широтно-импульсной модуляции (метода модуляции базовых векторов), который расширяет диапазон формирования выходных синусоидальных напряжений на 15% по сравнению с методами стандартной центрированной ШИМ и на 30% уменьшает динамические потери в ключах инвертора.

5. Хорошие показатели по критерию производительность за минимальную стоимость.

Для обучения студентов и специалистов промышленности организовано 8 рабочих мест. На каждом рабочем месте имеется: персональный компьютер; отладочная плата МСК240 на базе микроконтроллера TMS320F240 с малогабаритным инвертором для управления трехфазными шаговыми, синхронными и вентильными двигателями; исполнительный двигатель с установленным на валу

импульсным датчиком положения и датчиком положения на элементах Холла; набор источников силового и приборного питания; полный комплект кросс-средств для разработки и отладки программного обеспечения на ассемблере и СИ (компиляторы, компоновщики, библиотекари, симуляторы и т.д.). Уникальным является программное обеспечение, разработанное фирмой «Technosoft» специально для целей обучения специалистов в области цифровых систем управления двигателями. Это не только монитор, позволяющий загрузить оттранслированную программу пользователя с персонального компьютера в кодовое ОЗУ или флэш-память микроконтроллера и выполнить ее, но и эмулятор всех встроенных на кристалл периферийных устройств, а также специальная интерактивная среда разработки и отладки комплексных проектов в области цифрового управления двигателями.

Эмулятор периферийных устройств представляет собой сложную компьютерную модель, постоянно взаимодействующую с платой МСК240 по последовательному каналу связи и имеющую простой и наглядный графический интерфейс. Например, изучая особенности встроенного аналого-цифрового преобразователя можно активизировать нужные каналы АЦП переключателями на экране компьютера, задать режим работы и частоту выборки данных, загрузить соответствующее приложение в память контроллера МСК240 и запустить его на выполнение. Более того, имеется возможность получить на компьютере в графической и текстовой форме результаты работы АЦП, а также изучить примеры программ на ассемблере и СИ, реализующих выбранные пользователем установки. Коротко говоря, имеется компьютерный помощник, который сопровождает слушателя по «дебрям» изучаемого периферийного устройства, позволяя эффективно изучать как особенности его архитектуры, так и приемы программирования.

Интерактивная среда разработки приложений в области цифрового управления двигателями представляет собой наиболее сложный и мощный программный продукт, который позволяет существенно ускорить процесс проектирования и отладки программ для систем управления двигателями. Пользователь получает возможность сделать любые из переменных своего проекта наблюдаемыми и зарегистрировать динамические процессы в оперативной памяти платы МСК240 с заданной частотой (функция встроенного цифрового осциллографа). Он может подключить к своей программе готовые модули, например, цифровые регуляторы, а также блок задания управляющих переменных по заранее заданному на компьютере ряду опорных точек с линейной интерполяцией сигнала задания между ними. Все это позволяет менять параметры и форму входного воздействия, визуализировать переход-

ные процессы в приводе и быстро оптимизировать структуру и настройки системы управления. Имеется ряд готовых проектов, в частности, несколько проектов систем векторного управления вентилями двигателями, которые могут использоваться как демонстрационные версии.

Наряду с обучением студентов в центре организованы занятия по повышению квалификации специалистов промышленности. Курс «Микроконтроллерные системы прямого цифрового управления двигателями» состоит из трех циклов:

1. Архитектура, способы адресации и система команд цифровых сигнальных микроконтроллеров. Способы решения типовых задач управления приводами (цифровые фильтры, цифровые регуляторы, интерполяторы, задатчики интенсивности, блоки преобразования координат и т.д.).

2. Техника эффективного применения и программирования встроенных периферийных устройств (таймеры, ШИМ-генераторы, модули сравнения и захвата, квадратурные декодеры, АЦП и т.д.).

3. Теория и практика проектирования и отладки современных систем векторного управления приводами переменного тока (асинхронными, синхронными, шаговыми, вентильными и вентильно-индукторными).

Каждый цикл рассчитан на 10-дневную работу с полным отрывом от производства: 4 ч лекций и 4 ч лабораторно-практических занятий. Освоение всех необходимых программных средств проходит в процессе решения конкретных задач. Ориентировочная стоимость каждого цикла обучения 250 дол. Иногородным предоставляется гостиница. По завершении каждого цикла выдаются государственные свидетельства о переподготовке. Прослушавшим полный курс и защитившим выпускную работу, выдается диплом о втором высшем образовании.

Хотелось бы, чтобы инженеры, желающие обучаться на курсах повышения квалификации, умели работать с компьютером (Windows, текстовые редакторы, электронные таблицы), а также имели практический опыт разработки каких-либо микропроцессорных систем, в том числе опыт программирования на ассемблере для любого из процессоров или микроконтроллеров. Запись на курсы производится через Internet, путем заполнения заявки на сайте <http://www.ti.mpei.ac.ru>, а также по тел/факсу 362-71-65 или тел. 362-71-51.

Список литературы

1. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам//CHIP NEWS. 1999. №1. С. 2—9.
2. Козаченко В. Ф., Грибачев С.Я. Новые микроконтроллеры фирмы «Texas Instruments TMS32x24x» для высокопроизводительных встроенных систем управления электроприводами//CHIP NEWS. 1998. №11—12. С.2—6.

Научная работа кафедры АЭП — направления и результаты

ЛАДЫГИН А.Н., зам. заведующего кафедрой АЭП МЭИ по НИР

В связи с юбилеем кафедры представляет несомненный интерес обзор имеющихся на сегодня результатов научной деятельности ее коллектива. Причем цель данной статьи — не только перечислить современные итоги, но и показать научный потенциал коллектива, активно действующего сегодня и готового решать не менее сложные задачи завтра.

Традиционно сфера научной деятельности кафедры включает очень широкий спектр работ — от теоретических работ, носящих фундаментальный характер, до опытно-конструкторских, монтажно-наладочных работ прикладного характера. В самом общем виде все эти работы по своим результатам можно отнести к следующим пяти направлениям (рисунок):

1. Развитие теории электропривода.
2. Разработка методического, программного и технического обеспечения процессов выбора, проектирования и испытаний элементов и систем электропривода.
3. Создание перспективных элементов электропривода.
4. Создание объектно-ориентированных электроприводов.
5. Создание систем автоматизации технологических процессов на базе взаимосвязанных электроприводов.

Конечной целью (эффектом) работ в любом из названных направлений по существу является:

— повышение качества работы механизмов (точность, энерго-ресурсосбережение и пр.) средствами регулируемого электропривода

или

— автоматизация производственных технологий средствами электропривода, а иногда — и их сочетание.

Результаты работ в направлении развития теории электропривода служат фундаментом для работ других четырех направлений. Практически все достижения сотрудников кафедры в области теории электропривода находят свое отражение в научно-технических публикациях и доступны широкому кругу специалистов.

Достаточно полное представление о результатах теоретических работ за последние пятнадцать лет дают «Труды МЭИ», ряд тематических выпусков которых целиком готовился кафедрой. Само название сборников [1—6] хорошо иллюстрирует направленность НИР.

Конечно, более исчерпывающее отражение результаты теоретических работ находят в научных монографиях. Фундаментальные работы профессоров ка-

федры: В.И.Ключева [7] — в области динамики электроприводов с развитой механической частью; Б.А.Ивоботенко [8] — в области дискретного электропривода с шаговыми двигателями; Н.Ф.Ильинского [9] — в области электроприводов с источниками момента — служат сегодня актуальной базой для многих разработок. Еще более расширяют теоретическую базу НИОКР пионерские работы ведущих научных сотрудников кафедры А.А.Никольского [9] — в области двухканальных следящих электроприводов с пьезокомпенсаторами и В.К.Цаценкина [11] — в области безредукторного электропривода с вентильными двигателями.

В работах сотрудников кафедры получили развитие и многие другие вопросы теории электропривода [12—24], относящиеся к динамике, устойчивости, чувствительности, синтезу регуляторов, оптимизации и другим разделам теории этих систем.

Интенсивное развитие получили на кафедре работы с результатами по второму из названных выше направлений. Прежде всего, это — разработки методического и программного обеспечения процессов выбора и проектирования элементов и систем электропривода. Следует отметить, что эти работы вплотную примыкают к теоретическим, поскольку в основном представлены в различного рода публикациях — от статей до монографий [25—34], и потребовали серьезной теоретической проработки. Разработки прикладного (экспертного) программного обеспечения [35—37] получили свое развитие в последнее десятилетие, прежде всего благодаря усилиям профессора Н.Ф.Ильинского, при руководстве и непосредственном участии которого создан ряд программ, доведенных до коммерческой реализации.

Работы по обеспечению испытаний и экспериментальных исследований электроприводов, хотя и имеют более глубокие корни, интенсивно развиваются лишь последние десять лет. Результаты большинства из них доведены до коммерческой реализации в виде испытательного оборудования с программно-методическим обеспечением [39—43]. Накопленный в этом направлении потенциал позволил на базе кафедры организовать и оснастить испытательную лабораторию электротехнических изделий (руководитель доц. Ю.Н.Сергиевский), которая с 1995 г. официально аккредитована в Системе сертификации ГОСТ Р [44].

Очень разносторонне ведутся на кафедре работы третьего направления [44—49]. Они представлены разработками различных элементов систем электропривода, включая управляющую и силовую электронику, микропроцессорные устройства и электричес-



НИР и ОКР кафедры АЭП МЭИ

кие двигатели. За последние пять лет доведены до практической реализации и используются различными заказчиками следующие разработки:

- устройство гибридного типа для мягкого пуска асинхронных электроприводов;
- микропроцессорная система на перспективной элементной базе для встроенных систем управления электроприводов;
- прототипы вентильно-индукторных двигателей;
- комплектные устройства управления для электроприводов экскаваторов;
- регуляторы напряжения для асинхронных электроприводов подъемных механизмов;
- преобразователи частоты для асинхронных электроприводов широкого применения.

Практический опыт, накопленный в этом направлении работ, позволяет многим сотрудникам кафедры выступать в качестве квалифицированных экспертов по тому или иному типу электронных компонентов или элементов электропривода, представляемых на нынешнем российском рынке различными фирмами [50—55].

Традиционно широко представлены на кафедре работы четвертого направления. Имеются реализо-

ванные разработки специализированных электроприводов, ориентированных на применение в самых различных технологических объектах: экскаваторы [56] (унифицированные электроприводы постоянного и переменного тока для агрегатов горнодобывающей отрасли), насосы, вентиляторы, грузоподъемные и другие машины массового применения [57—59], тянущие и перематывающие устройства [60], компьютеризированные сборочные производства [61].

Наиболее трудоемкими и от того наиболее значительными для кафедры являются результаты работ по созданию систем автоматизации технологических процессов, требующих использования достижений всех предыдущих направлений. За последние пять лет можно отметить четыре таких работы:

- система управления лазерной машиной для обработки алмазов (заказчик — смоленский завод «Кристалл», руководитель работы — А.П.Балковой [66]);
- светотехнический комплекс для испытаний прожекторов (заказчик — Московский завод «Прожектор», руководитель работы — А.П.Балковой);
- установка для прецизионной обточки автомобильных поршней;

— стенд для измерения геометрических параметров поршневых изделий (заказчики — моторостроительные заводы, руководитель работ — А.А.Никольский [67]).

Следует отметить, что кафедра всегда придавала серьезное значение пропаганде самых передовых решений в области электропривода. Уже стала традицией организация регулярных научно-технических семинаров в феврале каждого года. Приводимый перечень названий проведенных семинаров позволяет судить об актуальности их тематики.

1994 г. — Современный регулируемый электропривод малой и средней мощности на основе интеллектуальной силовой электроники и микропроцессорных средств управления.

1995 г. — Энергосберегающий электропривод насосов и вентиляторов в промышленности и коммунальном хозяйстве.

1996 г. — Вентильно-индукторный электропривод — проблемы развития и перспективы применения.

1997 г. — Электрический привод — повышение эффективности использования.

1998 г. — Преобразователи частоты в современном электроприводе [68].

1999 г. — Микроконтроллеры в электроприводе.

В заключение отметим, что более подробно о направлениях и нынешних результатах научной работы можно узнать из страницы кафедры в Internetе по адресу: <http://aep.mpei.ac.ru>.

Прямые контакты можно установить по следующим телефонам и адресу электронной почты:

тел. 362-74-25

факс. 273-13-48

E-mail: aepmain@aep.mpei.ac.ru

Список литературы

1. Энергосбережение в электрическом приводе // Тр. МЭИ. 1985. Вып. 55.
2. Автоматизация электроприводов на базе микропроцессорных средств / Тр. МЭИ. 1986. Вып. 100.
3. Повышение эффективности промышленных установок средствами электропривода // Тр. МЭИ. 1987. Вып. 150.
4. Электроприводы с улучшенными технико-экономическими показателями // Тр. МЭИ. 1986. Вып. 165.
5. Методы и средства повышения технического уровня электроприводов // Тр. МЭИ. 1989. Вып. 213.
6. Электропривод и системы управления // Тр. МЭИ. 1995. 1996. 1997. Выпуски 672, 674 и 675.
7. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия. 1971
8. Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский Л.А. и др. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. М.: Энергия, 1971.
9. Ильинский Н.Ф. Электроприводы постоянного тока с управляемым моментом. М.: Энергоиздат, 1981.
10. Никольский А.А. Точные двухканальные следящие электроприводы с пьезокомпенсаторами. М.: Энергоатомиздат, 1988.

11. Цаценкин В.К. Безредукторный автоматизированный электропривод с вентильными двигателями. М.: МЭИ, 1991.

12. Козырев С.К. Оптимизация скоростных режимов электроприводов со сложными графиками движения // Электричество. 1984. №2.

13. Ильинский Н.Ф., Горнов А.О. Критерии эффективности процесса электромеханического преобразования энергии // Электричество. 1987. №10.

14. Ладыгин А.Н. Управление тиристорными электроприводами постоянного тока с использованием прогнозирующих моделей // Электротехника. 1990. №1.

15. Лебедев А.С. Динамика двухзонного электропривода постоянного тока // Электротехника. 1996. № 7. С. 12—14.

16. Алферов В.Г. О проблеме параметрической чувствительности в системах управления позиционных электроприводов постоянного тока // Электричество. 1996. № 1. С. 42—44.

17. Терехов В.М. Стабилизация движения тихоходных электроприводов на основе FUZZY-логики // Электричество. 1996. № 8. С.21—23.

18. Масандилов Л.Б. и др. Особенности квазичастотного управления асинхронного электропривода // Электротехника. 1994. №5—6.

19. Алферов В.Г. и др. Введение прогнозирования в системы управления электроприводов позиционных механизмов // Вестник МЭИ. 1996. №2.

20. Никольский А.А., Крюков В.А. Повышение точности электроприводов при воспроизведении циклических движений // Тр. МЭИ. 1997. Вып. 675.

21. Садовский Л.А., Черенков А.В. Разработка математической модели четырехфазного вентильно-индукторного привода // Тр. МЭИ. 1997. Вып. 675.

22. Бычков М.Г., Ильинский Н.Ф., Кисельникова А.В. Расчет механических характеристик вентильно-индукторного электропривода // Тр. МЭИ. 1997. Вып. 675.

23. Бычков М.Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учетом локального насыщения магнитной системы // Электричество. 1998. № 6.

24. Бычков М.Г. Оптимизация режимов вентильно-индукторного электропривода средствами управления // Вестник МЭИ. 1998. №3.

25. Анисимов В.А., Горнов А.О. Элементы конструирования низковольтных электротехнических установок М.: МЭИ, 1994.

26. Бычков М.Г. Применение промышленных программируемых контроллеров для автоматизации технологических процессов. М.: МЭИ, 1992.

27. Козаченко В.Ф., Бычков М.Г. Разработка программного обеспечения микропроцессорных систем с использованием кросс-средств персонального компьютера. М.: МЭИ, 1995.

28. Ивоботенко Б.А., Козаченко В.Ф. Шаговый электропривод в робототехнике. М.: МЭИ, 1984.

29. Терехов В.М. Непрерывные и цифровые системы управления скоростью и положением электроприводов. М.: МЭИ, 1996.

30. Ключев В.И. Энергетика электропривода. М.: МЭИ, 1994.

31. Лебедев А.С., Остриров В.Н., Садовский Л.А. Электроприводы для станков и промышленных роботов. М.: МЭИ, 1994.

32. Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат, 1981.
33. Масандилов Л.Б. Электропривод подъемных кранов. М.: МЭИ, 1998.
34. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам//CHIP NEWS. 1999. №1.
35. Ильинский Н.Ф. Прикладные компьютерные программы для массового электропривода // Электротехника. 1994. № 7.
36. Масандилов Л.Б., Мельник Р.Р. Система программ для расчета и анализа асинхронного электропривода с реверсивным тиристорным преобразователем напряжения // Электротехника. 1998. № 9.
37. Прудникова Ю.И., Жарников С.И., Кузнецова В.Н. Компьютерная программа "Вентиляторы. Управление производительностью и экономия энергии"//Тр. МЭИ. 1997. Вып. 675.
38. Соколов М.М., Масандилов Л.Б. Измерение динамических моментов в электроприводах переменного тока. М.: Энергия, 1975.
39. Бычков М.Г. и др. Экспериментальные исследования шума и вибраций в вентильно-индукторном электроприводе//Электричество. 1997. № 12. С. 41—46.
40. Сарач Б.М. и др. Многоцелевой стенд для испытания двигателей, механизмов и передач // Тр. МЭИ. 1995. Вып. 672.
41. Ильинский Н.Ф., Бычков М.Г., Сидоров Д.В. Компьютеризированная версия многофункционального нагруженного устройства // Тр. МЭИ. 1995. Вып. 672.
42. Платонова В.Е., Сергиевский Ю.Н., Романов А.М. и др. Универсальная установка для электрических испытаний двигателей, преобразователей, комплектных электроприводов и трансформаторов // Тр. МЭИ. 1996. Вып. 674.
43. Сергиевский Ю.Н. и др. Испытательная лаборатория МЭИ в помощь рынку электроприводов//Приводная техника. 1997. № 4. С.44—45.
44. Ключев В.И. и др. Модульные тиристорные преобразователи для тяжелых условий эксплуатации// Приводная техника. 1997. №3.
45. Кудрявцев А.В., Богаченко Д.Д., Ладыгин А.Н. и др. Преобразователь частоты для регулируемого электропривода широкого применения // Электротехника. 1994. №7.
46. Остриров В.Н. и др. Преобразователи для асинхронных частотно-регулируемых электроприводов широкого применения// Приводная техника. 1997. № 2. С.15—17.
47. Балковой А.П., Петровичев С.В., Сливинская Г.А. Система управления прецизионным линейным шаговым электроприводом на базе изделий фирм «Texas Instruments» и «International Rectifier»//Инженерная микроэлектроника. 1998. № 1.
48. Козаченко В.Ф. и др. Комплект аппаратно-программных средств для встраиваемых систем прямого цифрового управления электроприводами на базе микроконтроллера INTEL 8xC196MH // CHIP NEWS. 1999. № 1.
49. Балковой А.П., Петровичев С.В. Инвертор для прецизионного электропривода//CHIP NEWS. 1998. № 8.
50. Козаченко В.Ф. Микроконтроллеры: руководство по применению 16-разрядных микроконтроллеров Intel MCS-196/296 во встроенных системах управления. М.: ЭКОМ, 1997.
51. Козаченко В.Ф. и др. Новые DSP-микроконтроллеры фирмы «Analog Devices» ADMC300/330 для высокопроизводительных систем векторного управления электроприводами переменного тока//CHIP NEWS. 1998. № 5 (26).
52. Козаченко В.Ф. и др. Новые микросхемы прямого цифрового управления двигателями фирмы «Analog Devices»//Новые компоненты. Приложение к журналу «Электронные компоненты». 1998. Вып. 2 (5) .
53. Бычков М.Г. Компоненты фирмы «MOTOROLA» для электропривода. 1997.
54. Кудрявцев А.В., Ладыгин А.Н. Современные преобразователи частоты в электроприводе//Приводная техника. 1998. № 3. С.21—28.
55. Ильинский Н.Ф. Вентильно-индукторный электропривод перед выходом на широкий рынок//Приводная техника. 1998. № 3. С.2—5.
56. Ключев В.И. Разработка и исследование экскаваторных электроприводов // Электротехника. 1995. №10.
57. Кудрявцев А.В., Богаченко Д.Д., Ладыгин А.Н. и др. Частотно-регулируемый электропривод насоса системы водоснабжения здания// Вестник МЭИ. 1995. №1. С. 73—75.
58. Масандилов Л.Б. Применение системы электропривода тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель для грузоподъемных машин // Электротехника. 1995. №10.
59. Горнов А.О., Москаленко В.В., Анисимов В.А. и др. Развитие функциональных возможностей асинхронных электроприводов с параметрическим управлением для рабочих машин и механизмов массового применения // Электротехника. 1995. №10.
60. Ильинский Н.Ф. Устройства для перематки длиннономерных гибких изделий//Приводная техника. 1998. № 8/9. С.38—41.
61. Балковой А.П., Козаченко В.Ф. и др. Многокоординатный комплектный дискретный электропривод с микропроцессорным управлением для компьютерного интегрированного производства // Вестник МЭИ. 1994. № 2.
62. Ильинский Н.Ф. Регулируемый электропривод энерго- и ресурсосбережение//Приводная техника. 1997. №3. С.21—23.
63. Кудрявцев А.В. и др. Экономичные методы регулирования производительности вентиляторов с асинхронным электроприводом // Вестник МЭИ. 1994. №2.
64. Ильинский Н.Ф. Энергосбережение в центробежных машинах средствами электропривода // Вестник МЭИ. 1995. №1.
65. Сарач Б.М. и др. Энергосберегающая насосная станция (опыт практической реализации) // Вестник МЭИ. 1995. №1.
66. Балковой А.П., Козаченко В.Ф. и др. Лазерный технологический комплекс для обработки алмазов // Вестник МЭИ. 1995. №4.
67. Никольский А.А., Кацевич В.Л., Ходнев Н.Н. Разработка автоматизированного стенда для измерения геометрических параметров поршневых изделий // Тр. МЭИ. 1997. Вып. 675.
68. Преобразователи частоты в современном электроприводе. М.: МЭИ, 1998.

Разработки и исследования экскаваторных электроприводов

КЛЮЧЕВ В.И., МИРОНОВ Л.М., РЕЗНИКОВСКИЙ А.М., ФОМИН С.А.

Рассмотрены основные этапы совершенствования экскаваторных электроприводов за период 50-х — 90-х годов. Обобщены результаты эксплуатации разработанных на кафедре АЭП МЭИ специализированных экскаваторных тиристорных преобразователей 1-го поколения и представлена разработка новой серии преобразователей 2-го поколения. Показаны перспективы развития экскаваторного электропривода переменного и постоянного тока при использовании новой схемотехники силовой и информационной частей преобразователей.

Электропривод основных механизмов одноковшовых экскаваторов является наиболее характерным представителем промышленных электроприводов с особо тяжелыми условиями эксплуатации. Интенсивный повторно-кратковременный режим работы с резко переменной нагрузкой, с механическими перегрузками вплоть до резких стопорений, со значительными активными и инерционными нагрузками, с одной стороны, и работа в полевых условиях, без постоянного квалифицированного ухода, с другой, определяют сложный комплекс предъявляемых к электроприводу требований. Еще в первой половине XX века создание первых экскаваторов средней производительности потребовало применения системы генератор — двигатель, которая до настоящего времени является практически единственной системой электропривода их основных механизмов.

Совершенствование экскаваторных электроприводов в середине века шло за счет замены применявшихся в качестве возбудителей генераторов электромашинных усилителей (ЭМУ) простыми и надежными реверсивными магнитными усилителями (МУ). Созданная в 1953 г. на кафедре АЭП МЭИ В.И.Яковлевым научная группа экскаваторного электропривода приняла в этом процессе активное участие. По заказу Уралмашзавода для создававшегося в то время нового экскаватора-лопаты Э-6 была разработана оригинальная система МУ—Г—Д, в которой экскаваторные характеристики формировались без применения общепринятых электрических отсеков за счет регулирования смещения характеристик реверсивного магнитного усилителя. Совместно с заводом “Динамо” эта система была внедрена на экскаваторах Э-6, ЭКГ-8 производства УЗТМ, ЭКГ-8И и модификациях этой машины, выпускавшихся в течение многих лет Ижорским заводом.

В этот же период по заказу Новокраматорского машиностроительного завода (НКМЗ) были проведены разработки и исследования, имевшие целью создание оптимальной системы МУ—Г—Д для экскаваторов-драглайнов. Их результатом явилась разработка новой системы экскаваторного электроприво-

да, получившей название системы Г—Д с критическим самовозбуждением генератора, управляемой посредством магнитных усилителей. Была впервые реализована двухконтурная система подчиненного регулирования тока якоря и напряжения генератора, в которой роль регулятора тока выполняет силовой магнитный усилитель, причем за счет интегральной характеристики генератора с критическим самовозбуждением обеспечивается астатическое регулирование тока, а регулятором напряжения генератора является промежуточный магнитный усилитель.

Система МУ—Г—Д с критическим самовозбуждением генератора была совместно с НКМЗ внедрена на экскаваторах ЭШ-6/60, ЭШ-10/60, ЭШ-10/70 и всех других драглайнах, выпускавшихся НКМЗ с 1960 по 1985 гг. Эти экскаваторы широко применяются до настоящего времени на всех крупных разработках полезных ископаемых России.

Наряду с разработкой экскаваторных электроприводов по системе МУ—Г—Д были проведены теоретические и экспериментальные исследования динамики, имеющие целью ограничение динамических нагрузок основных механизмов экскаваторов с учетом влияния упругих механических связей, кинематических зазоров и кинематических погрешностей передач. Начатые в этом направлении исследования были существенно активизированы в связи с практической проблемой, возникшей у УЗТМ при переходе от выпуска экскаваторов-драглайнов типа ЭШ-15/90 с двухдвигательным приводом поворота к выпуску экскаваторов ЭШ-15/90А с четырехдвигательным электроприводом поворота с последовательным соединением всех двигателей в системе Г—Д. Увеличение вдвое числа двигателей при сохранении их последовательного соединения привело к практической не работоспособности поворота вследствие развития в переходных процессах резонансных колебаний, вызывающих недопустимую тряску платформы и опасные колебания в винтовой конструкции стрелы длиной 90 м. Для проведения исследований и поиска решения возникшей проблемы между УЗТМ и МЭИ был заключен договор, в процессе выполнения ко-

того были получены новые, представляющие практический интерес результаты.

Было установлено, что электропривод с линейной механической характеристикой при определенных сочетаниях параметров интенсивно демпфирует аналогично вязкому трению упругие колебания в механизме. Исследование влияния кинематических зазоров в валопроводах механизма поворота обнаружило, что возникновение колебаний с зазорообразованиями существенно расширяет зону резонанса в сторону низких частот, способствуя развитию опасных колебаний. При наличии открытого зубчатого зацепления вала-шестерни с венцом такая опасность существует всегда, но не реализуется благодаря демпфирующему действию электропривода.

Экспериментальные исследования четырехдвигательного электропривода поворота с последовательным соединением двигателей свидетельствовали об отсутствии демпфирования колебаний со стороны электропривода — значительные колебания скорости двигателей практически не вызывали колебаний тока якорной цепи. Было установлено, что основным возмущением, вызывающим резонансные колебания, является повышенная кинематическая погрешность открытых крупномодульных зубчатых зацеплений в валопроводах механизма, работающих с консистентной смазкой, и определена связь колебаний скорости двигателя с частотой и фазой перехода этих зацеплений с зуба на зуб.

Выявленные особенности позволили установить причину отсутствия демпфирования колебаний при последовательном соединении двигателей четырех валопроводов. Расстановка редукторов поворота на экскаваторе ЭШ-15/90А определила фазы возмущающих воздействий в валопроводах — скорости одной пары двигателей колебались синфазно, другой — противофазно. Как следствие, колебания их ЭДС не могли вызвать колебаний тока якоря, демпфирование упругих колебаний не возникало со всеми отмеченными выше последствиями. Проблема была решена изменением соединения двигателей с последовательного на параллельное соединение двух пар двигателей с синфазными колебаниями.

Позже конструкторы УЗТМ провели экспериментальные исследования влияния на колебательность двухдвигательного электропривода механизма поворота экскаватора ЭЖГ-4,6 фазы зацеплений валопроводов путем варьирования расстановки редукторов на его платформе, которые подтвердили результаты наших исследований.

В дальнейшей работе научной группы экскаваторного электропривода кафедры АЭП МЭИ теоретическим исследованиям динамики упругих электромеханических систем было уделено особое внимание [1]. С помощью ЭВМ были получены характеристики колебательности упругих двухмассовых электромеха-

нических систем при различных сочетаниях параметров и установлено, что предельное демпфирование колебаний определяется соотношением инерционных масс системы $\gamma = J_2/J_1$, где J_1 — момент инерции двигателя и жестко с ним связанных элементов. Было установлено, что критическое демпфирование, определяющее аperiodический характер процессов, наступает в системе с линейной механической характеристикой при $\gamma = 9$, если $T_2 = 0$, и при $\gamma = 5$, если $T_2 \neq 0$, а в системе с астатическим регулированием скорости — при $\gamma = 3$. Позже эти результаты были получены другими исследователями аналитическим путем [2].

Результаты исследований динамики упругих электромеханических систем послужили основой для решения проблемы ограничения динамических нагрузок основных механизмов экскаваторов при разработке новых, более быстродействующих систем экскаваторного электропривода, в частности, при переходе к современным электронным системам управления.

Этот переход назрел в конце 70-х годов, когда поступающие из-за рубежа экскаваторы были уже оснащены системой ТВ—Г—Д. У нас в стране интенсивную разработку этих систем для одноковшовых экскаваторов вел головной институт ВНИИэлектропривод. Перед нашей научной группой основной в то время наш заказчик — НКМЗ поставил задачу определить основополагающие принципы построения современных многокомпонентных электронных устройств, обеспечивающие их успешное применение в тяжелых условиях эксплуатации экскаваторных электроприводов. На основе анализа условий эксплуатации и обслуживания экскаваторного электрооборудования и перспектив развития этой области электропривода были сформулированы следующие предложения.

1. Для успешного перехода к современным электронным системам управления необходима разработка специализированной серии тиристорных преобразователей, максимально приспособленных к эксплуатации на экскаваторах, исключающих простои при возможных отказах электроники и необходимость ремонта сложной техники непосредственно на экскаваторах.

2. С целью унификации применяемых на экскаваторе преобразователей различного назначения и создания благоприятных условий для разработки и внедрения перспективной для экскаваторных электроприводов системы НПЧ—АД, экскаваторные преобразователи должны выполняться в виде унифицированных моноблоков, предназначенных для использования в качестве модулей для комплектования электроприводов в системах ТВ—Г—Д, ТП—Д, НПЧ—АД, ТРН—АД и АВК.

3. Для обеспечения повышенной надежности в основу разработки должен быть положен принцип выбора простейших отвечающих требованиям схе-

Таблица 1

Технические данные преобразователей ПТЭМ-1Р при $U_n=380В$

Модуль	$U_{ном}, В$	$I_{ном}, А$	$P_{ном}, кВт$	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Охлаждение
ПТЭМ-1Р-1	220	55	12	105×200×345	6	Естественное
ПТЭМ-1Р-2	220	160	35	270×200×350	16	—//—
ПТЭМ-1Р-3	220	363	80	500×200×320	26	—//—
ПТЭМ-1Р-4	220	750	165	500×200×320	26	6 м/с

технических решений с целью сокращения числа электронных элементов и пространственно интегрированная конструкция моноблоков, обеспечивающая повышенную помехозащищенность.

По заказу НКМЗ была разработана серия преобразователей тиристорных экскаваторных моноблочных первого поколения ПТЭМ-1Р, построенная на предложенных принципах, технические данные которой представлены в табл. 1.

Компактные, не имеющие подстроечных элементов, снабженные самодиагностикой блоки ПТЭМ-1Р в течение многих лет работают на экскаваторах и опыт их эксплуатации подтвердил правильность заложенных в их разработку принципов. Разработанное МЭИ совместно с НКМЗ на базе преобразователей ПТЭМ-1Р-2 НКУ главными приводами экскаватора-драглайна по системе ТВ—Г—Д было впервые установлено на экскаваторе ЭШ-11/70 №1, который до настоящего времени работает на угольном разрезе Тулауголь. В 1985 г. этот комплект был принят межведомственной комиссией и с тех пор экскаваторы НКМЗ выпускались с этой системой тиристорного возбуждения. Межведомственная комиссия при испытаниях экскаватора ЭШ-11/70 №1 установила, что при отказе преобразователя машинист в соответствии с инструкцией заменяет неисправный преобразователь резервным, сообщает электрикам о наличии на экскаваторе неисправного блока и продолжает работу. При этом было зафиксировано время восстановления работоспособности привода 7 мин при принятом допустимом времени восстановления без фиксации простоя 15 мин.

Производство преобразователей ПТЭМ-1Р и НКУ на их основе с начала 90-х годов освоено специализированным предприятием АООТ «Рудоавтоматика», г. Железногорск. В период экономических трудностей основным путем повышения эффективности работы парка экскаваторов является модернизация их электроприводов, в первую очередь массовых экскаваторов-лопат ЭКГ-8И, ЭКГ-10 по системе ТВ—Г—Д. В поставляемых для этой цели НКУ на базе преобразователей ПТЭМ-1Р-2 используются указанные выше возможности унификации и оптимальная структура управления главными приводами по системе ТВ—Г—Д.

Преобразователи ПТЭМ-1Р имеют трехфазную нулевую реверсивную схему, НКУ содержит 8 блоков ПТЭМ-1Р-2: один блок — питание собственных нужд, три — возбуждение генераторов, два — возбуждение синхронного двигателя, один блок обеспечивает управление двигателем открывания днища ковша по системе ТП—Д, он же используется для запуска преобразовательного агрегата по системе ТП — генератор напора, восьмой блок является резервным.

Разработанная двухконтурная система подчиненного регулирования тока якоря и напряжения генератора с установленным на входе двухступенчатым зависимым задатчиком интенсивности обеспечивает требуемое быстродействие приводов и эффективное ограничение динамических нагрузок механизмов. По отзывам Михайловского ГОК модернизация экскаваторов ЭКГ-8И уменьшает износ механизмов и в 2—3 раза увеличивает межремонтные сроки.

Сегодня научная группа экскаваторного электропривода кафедры АЭП МЭИ завершает разработку серии преобразователей ПТЭМ-2Р второго поколения, в которой учтен опыт эксплуатации преобразователей ПТЭМ-1Р и использована более совершенная база электронных комплектующих. Технические данные преобразователей ПТЭМ-2Р представлены в табл. 2.

Нетрудно видеть, что новая серия преобразователей имеет лучшие массогабаритные показатели и существенно повышенную надежность за счет сокраще-

Таблица 2

Технические данные преобразователей ПТЭМ-2Р

Модуль	$U_{ном}, В$	$U_{ном}, В$	$I_{ном}, А$	$P_{ном}, кВт$	$V_{охл}, м/с$	Масса, кг	Габаритные размеры, мм	Силовой элемент
ПТЭМ-2Р-11	380	220	35	8	0	5	70×230×350	МТОТО-80
ПТЭМ-2Р-12	380	220	68	15	0	5	70×230×350	МТТ-80
ПТЭМ-2Р-21	380	220	73	16	0	11	150×230×350	МТОТО-160
ПТЭМ-2Р-22	380	220	140	30	0	11	150×230×350	МТТ-160
ПТЭМ-2Р-31	380	220	200	44	0	18	320×230×320	Т-400
ПТЭМ-2Р-32	660	380	421	160	6	18	320×230×320	Т-400
ПТЭМ-2Р-41	380	220	400	88	0	26	500×230×320	Т-800
ПТЭМ-2Р-42	660	380	420	311	6	26	500×230×320	Т-800

ния числа электронных элементов в 2,5 раза и уменьшения вдвое числа соединительных жгутов. Повышена ремонтпригодность преобразователей — конструкция типа «книжка» обеспечивает свободный доступ ко всем элементам, установленным на печатных платах при безразъемном исполнении всех внутренних цепей. Применение преобразователей ПТЭМ-2Р и разработанной структуры управления успешно решает проблемы современного экскаваторного электропривода по системе ТВ—Г—Д.

Перейдя к оценке перспектив развития экскаваторного электропривода, отметим, что по нашему убеждению в обозримом будущем основной системой экскаваторного электропривода будет оставаться система Г—Д, однако в ближайшем будущем начнется процесс перехода на серийно выпускаемых экскаваторах средней производительности к применению системы ПЧ—АД. Сравнение преобразователей частоты со звеном постоянного тока на транзисторах IGBT с непосредственными преобразователями частоты убеждает нас в том, что перспективным для экскаваторов является преобразователь с одной ступенью преобразования энергии, со свободным обменом энергией с сетью — непосредственный преобразователь частоты [3].

Научная группа экскаваторного электропривода кафедры АЭП МЭИ с 1984 г. ведет разработки и исследования, имеющие целью создание асинхронного экскаваторного электропривода по системе НПЧ—АД на основе отмеченных принципов, впервые реализованных в серии тиристорных преобразователей ПТЭМ-1Р. В отличие от общепринятой была обоснована и практически реализована компоновка экскаваторных непосредственных преобразователей частоты различной пульсности и фазности из модулей — трехпульсных реверсивных тиристорных преобразователей постоянного тока ПТЭМ-1Р. На основе проведенных теоретических и лабораторных исследований по заказу НКМЗ был разработан комплект электрооборудования главных приводов экскаватора драглайна ЭШ-6/45 по системе НПЧ—АД при использовании двухфазных АД серии АДЧ.

Схема электропривода поворота, представленная на рис.1, была установлена и испытана на экскава-

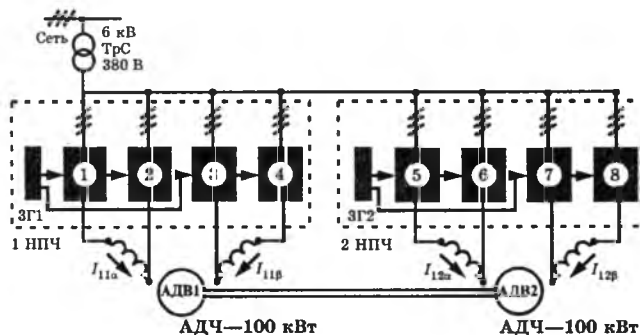


Рис.1. Схема электропривода поворота экскаватора ЭШ-6/45 по системе НПЧ—АД на базе модулей ПТЭМ-1Р-31

торе ЭШ-6/45 на Орджоникидзевском ГОК.

При испытаниях были получены требуемые статические характеристики и динамические свойства разработанного электропривода, причем отмечено, что благодаря меньшему в три раза моменту инерции АД поворота ограничение динамических нагрузок валопроводов в сравнении с приводом постоянного тока существенно упрощается.

К сожалению, из-за отказа поставки двухфазных двигателей АДЧ для приводов подъема и тяги испытания новой системы в условиях эксплуатации экскаватора не состоялись. Позже интерес к электроприводу переменного тока в связи с экономическими трудностями практически угас.

Однако несмотря на отсутствие финансирования разработки и исследования системы НПЧ—АД не прерывались благодаря сотрудничеству с АООТ «Рудоавтоматика», оказывающему помощь изготовлением макетных и опытных образцов разрабатываемых устройств. С учетом ситуации эти работы были направлены на создание НПЧ для модернизации действующего парка грузоподъемных машин, оборудованных АД с фазным ротором и релейно-контакторным управлением либо АД с короткозамкнутым ротором.

При испытаниях системы НПЧ—АД на экскаваторе ЭШ-6/45 была установлена необходимость разработки СИФУ тиристорных преобразователей, формирующей непрерывное следование управляющих импульсов. Это требование было реализовано в разработке второго поколения преобразователей ПТЭМ-2Р. Их использование для компоновки НПЧ существенно расширило возможности создания регулируемых асинхронных электроприводов различного назначения. В частности, разработана и испытана в лабораторном эксперименте система НПЧ — трехфазный АД, в которой обеспечивается плавное частотное управление пуском, реверсом и торможением в диапазоне частот от 0 до 50 Гц, плавное регулирование скорости от 0 до 25 Гц и синхронизированный с сетью установившийся режим работы на частоте 50 Гц, близкий к режиму питания двигателя от сети. Рекуперация энергии в тормозных режимах, качественное формирование переходных процессов и возможность регулирования скорости до 50 Гц соответствуют требованиям к электроприводу крановых и экскаваторных механизмов. Совместно с ВНИПТИ АЭК «Динамо» в настоящее время ведется работа, имеющая целью модернизацию крановых асинхронных электроприводов с реостатным регулированием.

Говоря о перспективах развития экскаваторного электропривода, уместно упомянуть комплект электроприводов по системе ПЧ—АД, предлагаемый одной из западных фирм для модернизации электроприводов экскаватора ЭКГ-8. Предлагается применить систему с общим звеном постоянного тока с преоб-

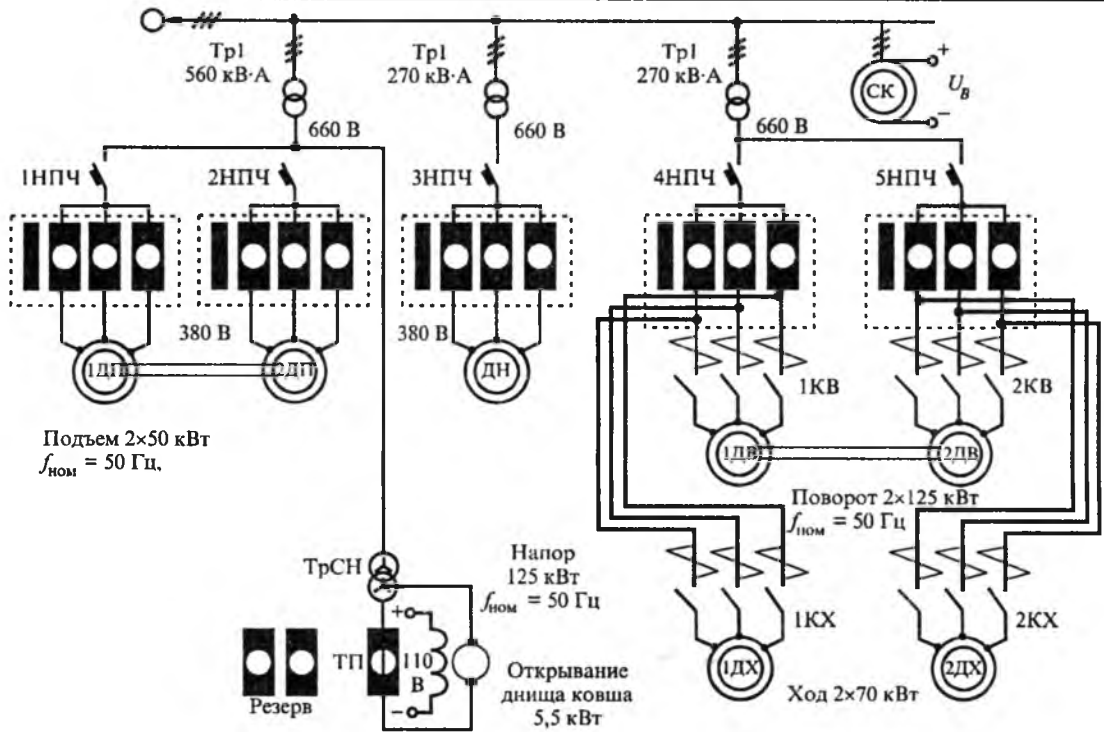


Рис.2. Схема модернизации электроприводов ЭКГ-8И по системе НПЧ—АД на базе ПТЭМ-2Р-32

разователями частоты на транзисторах IGBT. Для рекуперации энергии в сеть питания шин постоянного тока осуществлено от ведомого сетью инвертора на запираемых тиристорах GTO мощностью 1700 кВ·А.

В связи с этим предложением АООТ “Рудоавтоматика” обратилось к нам с просьбой предложить вариант модернизации того же экскаватора по системе НПЧ—АД. Схема модернизации электроприводов ЭКГ-8И по системе НПЧ—АД на базе модулей ПТЭМ-2Р-32 (см. табл. 2) представлена на рис.2. Здесь электроприводы основных механизмов благодаря наличию трансформаторов $Tr1$, $Tr2$, $Tr3$ потенциально не связаны, каждый двигатель получает питание от НПЧ, состоящего из задающего генератора и трех преобразователей ПТЭМ-2Р-32. При работе на основной скорости, $f_1 = 50$ Гц, коэффициент искажений тока двигателей близок к единице. Для ком-

пенсации реактивной мощности и сглаживания нагрузок на слабую карьерную сеть предусмотрен синхронный компенсатор СК.

На наш взгляд, это перспективное решение, хорошо соответствующее специфике экскаваторных приводов, с обеспеченным резервированием всех НПЧ за счет двух резервных ТП и имеющее в 2—2,5 раза меньшую стоимость по сравнению с известными решениями. Недостатком является искажение формы токов при работе со сниженной скоростью, обусловленное низкой пульсностью ($m=6$). В связи с этим значительный интерес представляет разработка исполнения модульных преобразователей ПТЭМ—2Р на транзисторах IGBT, которая начата два года назад и уже получены важные положительные результаты.

Завершена разработка схемотехники транзисторного преобразователя с трехфазной нулевой схемой выпрямления, при этом сохранена структура тиристорного исполнения и созданы узлы, обусловленные особенностями транзисторов. Изготовлен макетный образец и проведены его лабораторные испытания, которые показали широкие возможности качественного формирования синусоидальных напряжений и токов. На рис.3 представлены осциллограммы тока при работе на активно-индуктивную нагрузку при изменениях частоты в широких пределах.

Проработан вариант схемы модернизации электроприводов экскаватора ЭКГ-8И по системе НПЧ—АД на базе транзисторных преобразователей. Схема отличается от представленной на рис.2 отсутствием синхронного компенсатора и предусматривает в связи с будущим падением напряжения на транзисторах

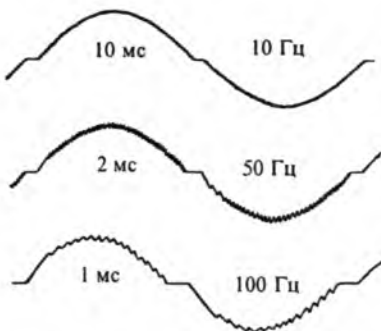


Рис.3. Формирование синусоидальных токов транзисторным преобразователем

использование преобразователей четвертого габарита ПТЭМ-2Р-43. При этом, естественно, увеличивается стоимость комплекта электрооборудования по сравнению с тиристорным вариантом.

Сегодня наша научная группа готовит внедрение серии современных экскаваторных преобразователей ПТЭМ-2Р и продолжает работу в направлении создания частотно-управляемых асинхронных электроприводов.

В результате многолетней работы научной группы экскаваторного электропривода кафедры АЭП

МЭИ внесен весомый вклад аспирантами, научными сотрудниками, инженерами, студентами, работавшими в свое время в нашей группе.

Список литературы

1. Ключев В.И. Ограничение динамических нагрузок электропривода. М.: Энергия, 1971.
2. Земляков В.Д., Задорожный Н.А. О демпфировании электроприводом постоянного тока упругих электромеханических колебаний //Изв. вузов. Электромеханика. 1984.
3. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1998.

Современные способы управления и их применение в электроприводе

ТЕРЕХОВ В.М.

Дан краткий обзор современных способов управления, созданных теорией автоматического управления. Применительно к электроприводе выделены два уровня управления и соответствующие им способы управления. Отмечены особенности типовых способов и применения их к электроприводам постоянного и переменного токов. Дана краткая характеристика новых нетрадиционных способов управления — нейронных сетей и фаззи-логики.

Способы управления — широкое понятие теории автоматического управления, распространяемое сегодня на самые разнообразные объекты — системы технические, экономические, экспертные. Среди различных технических систем электропривод (ЭП) — наиболее представительный, распространенный и сложный объект управления. Не случайно, что создатели ряда общих методов управления — Keesler, Zadeh, Kosko и другие ученые электротехнических наук привлекали для иллюстрации своих идей электромеханические объекты.

Применительно к электроприводе можно выделить два уровня управления: внешний (верхний), который вырабатывает технологическую программу работы ЭП, и внутренний (нижний), который формирует статические и динамические свойства ЭП. Система управления внутреннего уровня является составной частью в понятии «регулируемый электропривод». Для выделенных уровней используются различные способы управления как классические традиционные, так и новые нетрадиционные (рис.1).

Классическое управление по отклонению с последовательной и параллельной коррекциями послужило основанием для создания таких способов, как скользящее, подчиненное, модальное, векторное, адаптивное управления, которые могут формировать высокие динамические и регулировочные свойства электропривода. Например, использование

способа управления со скользящим режимом позволило создать весьма простую и надежную систему управления для следящего ЭП (СЭП) широкого класса антенных установок системы связи «Орбита» (рис.2). В данном СЭП, в разработке которого кафедра АЭП



Рис.1. Способы управления, применяемые к двум уровням управления электропривода

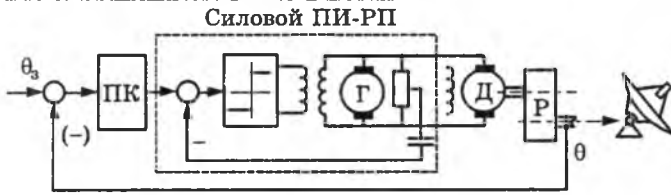


Рис.2. Схема электропривода с системой управления со скользящим режимом

МЭИ принимала активное участие, контур напряжения генератора (G) с возбудителем с идеальной релейной характеристикой функционально представляет собой силовой пропорционально-интегральный регулятор положения, работающий непосредственно на двигатель (D). Многолетняя эксплуатация данного СЭП показала высокие надежность, помехоустойчивость, совместимость с радиосистемой и достаточную точность наведения. Желание снизить капитальные и эксплуатационные затраты обусловило при модернизации СЭП замену генератора тиристорным преобразователем с переходом на систему управления с подчиненным регулированием координат.

Способ подчиненного управления с контурами тока (момента) и скорости двигателя нашел весьма широкое применение не только в электроприводах постоянного тока, но и в ЭП с двигателями переменного тока — синхронными (в схеме вентильного двигателя) и асинхронными. При этом в асинхронном ЭП с преобразователем частоты наряду со скалярным управлением (управление действующими значениями электрических величин) уделяется все большее внимание векторному управлению, т.е. управлению модулем и фазой мгновенных значений напряжения, тока, потокосцепления. При таком управлении динамические и регулировочные характеристики асинхронного ЭП оказываются не хуже, чем в ЭП постоянного тока. Сложность структуры векторного управления с преобразованием координат и косвенной оценкой ряда переменных преодолевается сочетанием современной цифровой техники с методологией наблюдающих устройств (наблюдателей).

Традиционное подчиненное управление теряет свою эффективность в сложных взаимосвязанных, многомассовых электромеханических системах, в которых выходной управляемой координатой является не вал двигателя, а рабочий орган установки. Для таких систем сегодня находит применение модальное управление, в котором ЭП замыкается по вектору состояния объекта управления, выделяемому непосредственно датчиками или косвенно через наблюдатель (рис.3). Разработанный теоретически относительно давно способ модального управления приобрел практическую значимость в настоящее время благодаря современной аналоговой и цифровой элементной базе, используемой для построения наблюдате-

ля, который минимизирует число датчиков. Модальное управление может выполняться частичным, т.е. ЭП замыкается не по полному вектору состояния, а только по его части, при условии сохранения приемлемых показателей качества ЭП. Данное управление, как показали исследования, оказалось эффективным для СЭП крупных радиотелескопов [1,2].

Относительно недавно, в 50—60 годах, появились новые нетрадиционные способы управления. Это весьма универсальные способы, которые могут использоваться в технических, экономических и экспертных системах. К таким способам относятся нейронные сети и фаззи-логика. Нейронная сеть в разработках представляется как многоканальная модель нервно-мозговой системы человека. В этой модели с входов (рецепторов) сигналы e_i (внешние раздражители) передаются по каналам связи (нервным волокнам) с некоторым коэффициентом передачи W_i (синапсы) в ячейки обработки сигнальной информации — нейроны (клетки коры головного мозга), выходные сигналы которых a , являющиеся функцией входных сигналов, передаются на исполнительные органы (мышцы) (рис.4,а). В нейронной сети заложена способность к обучению: путем изменения W_i согласно алгоритму обучения, например, Дельта-правилу — $W_{ij} = k \cdot e_i \cdot da_j$ добиваться минимального отклонения da_j выходной величины a_j от желаемого значения. Свойство обучаемости нейронной сети позволяет ее использовать применительно к задачам управления в качестве адаптивного регулятора. На рис.4,б представлена свернутая схема адаптивной системы с эталонной моделью и нейронным регулятором. Нейронная сеть (NN) регулятора принимает сигналы, соответствующие выходной координате и ее $n-1$ производным линейной модели объекта управления — не-

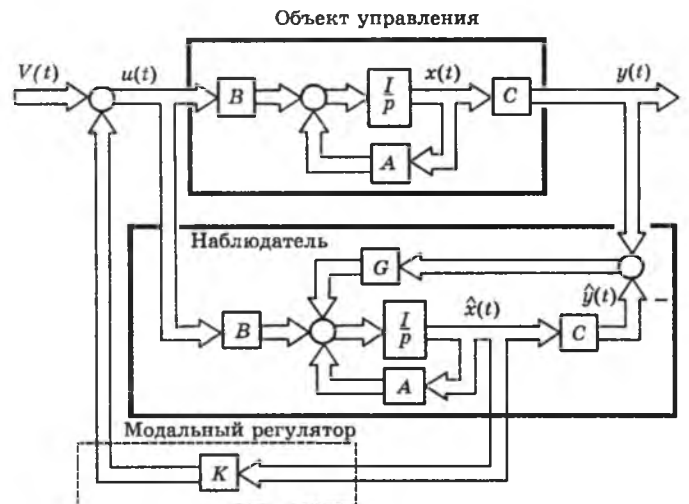


Рис.3. Схема электропривода с системой управления со скользящим режимом

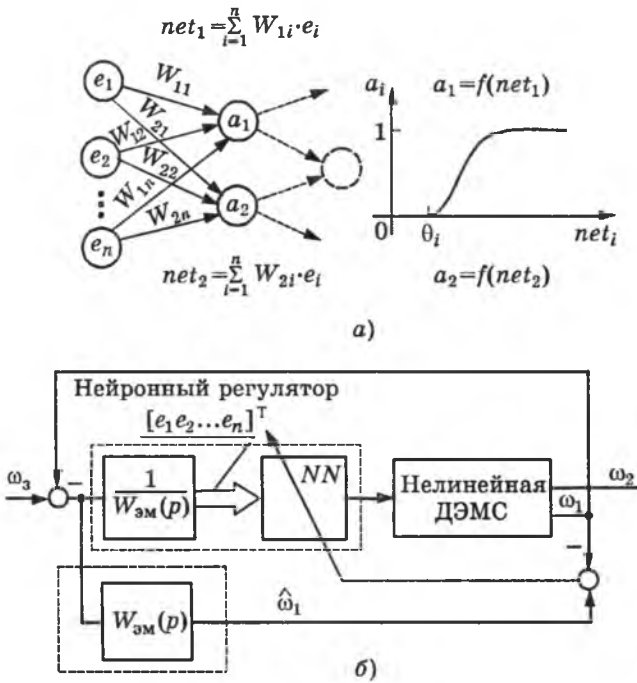


Рис.4. Структура нейронной сети (а) и схема адаптивной электромеханической системы с нейронным регулятором (б)

линейной двухмассовой электромеханической системы (ДЭМС). Данный регулятор делает нелинейную систему робастной, т.е. малочувствительной к изменению момента инерции рабочего органа (второй массы), за счет отыскания нужного значения передаточного коэффициента $NN - W_i$ в процессе обучения по Дельта-правилу [3].

Фаззи-логика, как и нейронная сеть, работает тоже на основе модели, но моделирует процесс ассоциативного мышления человека, т.е. мышления, объединенного в понятия образами-терминами, каждый из которых количественно оценивается не одним числом, а числовым множеством. В структуре системы с фаззи-управлением числовые значения входных физических переменных (x_i) преобразуются в фаззи-переменные — термины (A_{ij}) (процесс фаззификации — F_f), которые в блоке логических заключений (In_p) преобразуются в выходные фаззи-переменные (B_j), из которых в блоке дефаззификации (D_{ff}) выделяется управляющее воздействие (y), поступающее на объект управление (рис.5,а). При этом местоположение физической переменной в составе термина (фаззи-переменной) определяется так называемой функцией принадлежности — огибающей числовое множество термина.

Введение фаззи-регулятора в двухмассовую следящую систему со структурой подчиненного регулирования и с зазором в кинематической цепи обеспечило эффективную стабилизацию системы при сохранении точности слежения [3,4] (рис.5,б). Фаззи-регу-

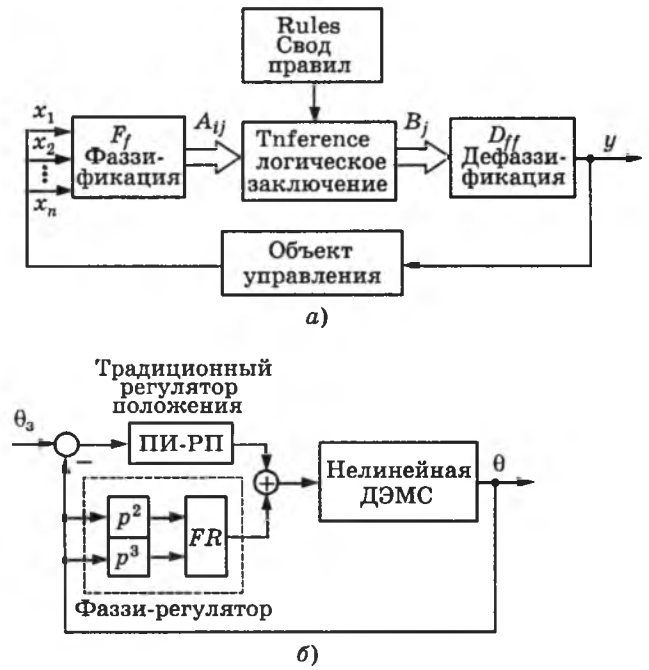


Рис.5. Структура системы с фаззи-управлением (а) и схема стабилизации двухмассовой следящей системы с дополнительным фаззи-регулятором (б)

лятор, простой в функциональном отношении, оказывается сложным при его синтезе, т.е. при составлении алгоритма управления в виде свода правил и функций принадлежности для входных и выходных фаззи-переменных. Такой синтез выполняется на основе моделирования итерационным методом. Данную процедуру можно автоматизировать, используя свойство обучаемости нейронной сети, которая будет отыскивать значение местоположений функций принадлежности по условию минимально возможного отклонения управляемого процесса от желаемой формы.

Все большее применение находит фаззи-логика в управлении технологическими процессами в промышленных и бытовых установках. Фаззи-управление позволяет мягко адаптироваться к изменяющимся условиям процесса и улучшать его через основной или дополнительный каналы управления. При этом функции электромеханических регуляторов технологического процесса выполняет электропривод индивидуальный или групповой, для которого фаззи-управление является внешним (технологическим) уровнем. Данная задача фаззи-управления также с полным основанием может решаться специалистами по электроприводе. Примеры объектов применения фаззи-логики по двум уровням управления в электроприводе приведены на рис.6.

К достоинствам новых способов управления, относящихся к категории интеллектуальных систем управления, можно отнести возможность:

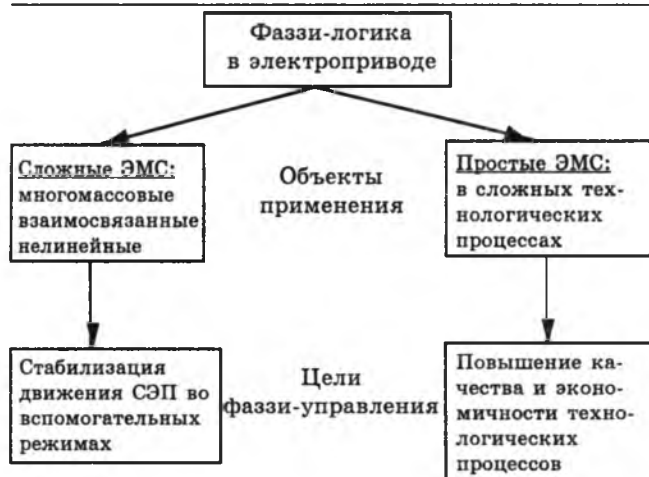


Рис.6. Возможные объекты и цели применения фаззи-логики в электроприводе по двум уровням управления

- реализовать любой требуемый для процесса нелинейный алгоритм управления;
- иметь неполное, неточное описание объекта управления, а для нейронной сети и отсутствие описания;

— создавать мягкую адаптацию, обеспечивающую робастность системе при нестабильности параметров.

Отклоняя существующие крайние оценки, оптимистическую и пессимистическую, можно утверждать, что данные новые способы следует применять там, где проблема с ними решается лучше и дешевле, чем с традиционными методами, или где без них проблема вовсе не решается.

Список литературы

1. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Тиристорные системы электропривода с упругими связями. Л.: Энергия, 1979.
2. Терехов В.М., Петухова Г.А. Демпфирующие средства в следящих редукторных электроприводах//Тр. МЭИ. 1981. Вып. 520.
3. Nauck D., Klawonn F., Kruse R. Neuronale Netze und Fuzzy-System. Braunschweig, 1996
4. Терехов В.М., Барышников А.С. Стабилизация движения тихоходных электроприводов на основе Fuzzy-логики//Электричество. 1996. № 8.
5. Терехов В.М., Владимирова Е.С. Некоторые аспекты применения фаззи-управления в электроприводах//Электричество. 1999. № 9.

Вентильно-индукторный привод для легких электрических транспортных средств¹

ИЛЬИНСКИЙ Н.Ф., БЫЧКОВ М.Г.

Приведены результаты разработки вентильно-индукторного электропривода для легких транспортных средств. Кратко изложен алгоритм бездатчикового управления приводом, показан эффективный способ снижения шума и вибраций.

Электроприводы для легких транспортных средств могут быть реализованы на базе различных технологий: на базе вентильного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами (ВДПМ) и на базе вентильно-индукторного двигателя (ВИД). Привод с ВДПМ подробно изучен и уже широко используется в малых транспортных средствах, тогда как привод с ВИД исследован мало и практически не применяется.

В МЭИ разработано несколько вариантов вентильно-индукторного электропривода (ВИП) для легких транспортных средств (9 кВт, 3000 об/мин и 160 Вт, 160 об/мин). Подробное экспериментальное исследование прототипов привода показало, что основные характеристики ВИП (механические, энергетические и др.) практически такие же, как у привода с ВДПМ. Существенное различие этих двух технологий — стоимость двигателя и его надежность, благодаря чему ВИП оказывается наиболее перспективным для массового использования в легких электрических транспортных средствах.

Вентильно-индукторный электропривод, состоящий из простейшего, дешевого и надежного вентильно-индукторного двигателя, электронного коммутатора на транзисторах MOSFET или IGBT и развитого микропроцессорного блока управления (рис.1), является наиболее подходящим техническим решением для таких электрических транспортных средств (ЭТС) как электровелосипеды, скутеры, мотороллеры, инвалидные кресла, легкие автомобили и т.п. Технология на основе ВИП обеспечивает высокие технические характеристики, надежность и наилучшее соотношение качества и цены, что наиболее важно при массовом производстве ЭТС.

Однако до сих пор существуют некоторые обстоятельства, ограничивающие использование технологии ВИП в ЭТС и, соответственно, ее широкое распространение на мировом рынке. Первое обстоятельство

¹ Статья подготовлена на основе доклада, сделанного на 16-м Международном симпозиуме по электрическим транспортным средствам EVS 16. Пекин, 12—16 октября 1999 г.

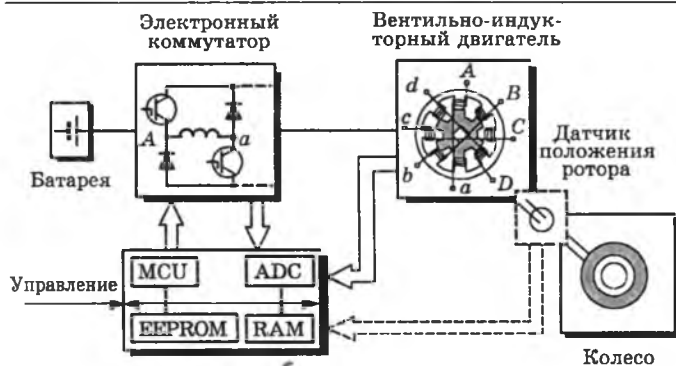


Рис.1. Вентильно-индукторный электропривод

ство определяется использованием в таких приводах датчика положения ротора (ДПР), что усложняет конструкцию привода в целом. Второе — часто сопровождающие работу привода существенные шум и вибрации из-за несовершенного управления. Третье — недостаточная разработанность оптимальных методов проектирования и алгоритмов управления, которые обеспечивали бы высокие рабочие характеристики привода.

В статье приведены некоторые результаты научно-исследовательских работ, направленных на устранение указанных негативных свойств ВИП и получение высококачественных мехатронных модулей ВИП для велосипедов и легких ЭТС.

Вентильно-индукторный двигатель для ЭТС имеет статор с n полюсами (рис. 1), несущими сосредоточенные обмотки, и пассивный явнополюсный ротор с m полюсами ($m \neq n$). Внешний ротор может использоваться как основа мотор-колеса. Обмотки статора подсоединены к источнику питания (батарее) через коммутатор, построенный на силовых ключах, обычно управляемых от датчика положения ротора (ДПР). Для формирования импульсов тока используется микроконтроллерное управление.

Привод работает следующим образом. Ключи периодически подключают фазные обмотки статора к батарее в последовательности $Aa—Bb—Cc—Dd$, что приводит за счет магнитного притяжения к смещению соответствующих полюсов пассивного ротора в направлении ближайших возбужденных полюсов статора. В результате ротор вращается в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля статора, с частотой

$$\omega = 2\pi f_k / mN_R,$$

где f_k — частота импульсов; m — число фаз; N_R — число полюсов ротора.

Описанная конструкция и принцип действия объясняют в целом главные преимущества ВИП: простота, низкая стоимость и высокая надежность двигателя. Все эти свойства, а также благоприятные рабочие и энергетические характеристики могут быть реализованы на практике только при соответствующем

управлении углами коммутации при включении и отключении фаз при соответствующей форме импульсов тока. Неадекватное управление, даже в случае, когда используется датчик положения ротора, приводит к сильной вибрации, шуму и значительному ухудшению эксплуатационных характеристик привода.

Датчик положения ротора, используемый в ВИП, является нежелательным элементом при массовом использовании привода, поскольку значительно усложняет его конструкцию. Исключение датчика положения ротора и снижение шума за счет соответствующего управления являются необходимым условием для широкого использования в ЭТС на мировом рынке.

Первая проблема была решена за счет создания специально разработанного и реализованного на практике оригинального способа управления коммутацией, когда текущая информация о значении токов используется для определения углов коммутации в любом режиме работы.

Идея замены датчика положения ротора специально организованным «наблюдателем» иллюстрируется рис.2,а. «Наблюдатель» основан на косвенном измерении мгновенного значения потокосцепления работающей фазы интегрированием ЭДС с коммутацией фаз в момент превышения потокосцеплением заданного значения, определяемого по мгновенному значению тока и кривой намагничивания при заданном угле коммутации (рис.2,б).

Реализация указанного способа в системе с релейным регулятором тока и ШИМ-генератором, ограничивающим частоту переключения силовых ключей инвертора, потребовала учета работы регулятора тока при пуске и работе на низких скоростях в вычислении потокосцепления. Экспериментальная проверка на базовом образце ВИП показала устойчивую работу алгоритма бездатчикового управления как в статических, так и в динамических режимах (пуск, наброс и сброс нагрузки) при изменении скорости в диапазоне 30:1, нагрузки от нуля до максимальной, уровня токоограничения на $\pm 50\%$. В качестве иллюстрации на рис.3 показаны начальные участки пуска в системе с датчиком и без датчика положения ротора.

Бездатчиковое управление может быть сравнительно просто реализовано для приводов большой мощности (киловатты и более), когда удельное сопротивление обмотки относительно мало. Для приводов малой мощности (сотни ватт) изменение сопротивления при повышении температуры необходимо принимать во внимание при разработке алгоритма управления; в противном случае привод может оказаться неуправляемым.

Описанный бездатчиковый способ управления ВИП может быть реализован на базе простого 8-битового микропроцессора типа MOTOROLA

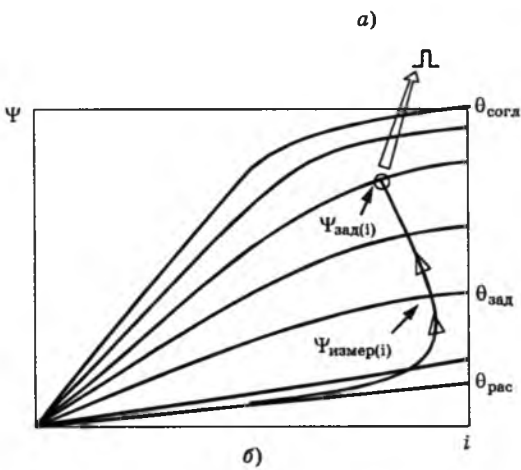
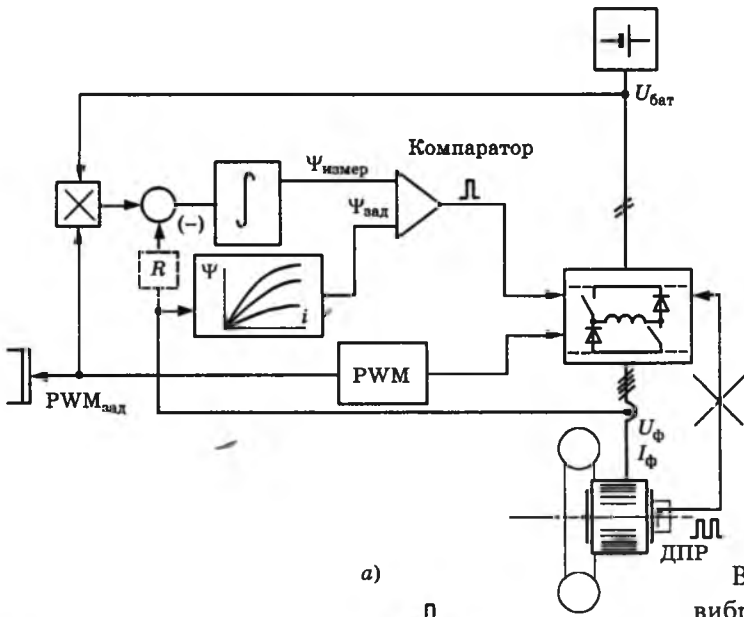


Рис.2. Блок-схема “наблюдателя” (а) и принцип формирования импульсов коммутации фаз (б)

МС68НС908MR24. Простейший бездатчиковый ВИП для ЭТС является вполне работоспособным. Механические и энергетические характеристики для привода 9 кВт, 3000 об/мин показаны на рис.4. Такие характеристики вполне пригодны для использования в ЭТС и при необходимости могут быть приведены к желаемой форме любым известным методом.

Предварительное исследование ВИП показало, что шум и вибрации существенно превышают допустимый уровень (рис.5), однако выявление основного источника шума и вибрации двигателя оказалось весьма сложной задачей: при работе всех фаз удавалось лишь определить спектр шума.

Существенные результаты были получены в специальных экспериментах, когда работала только одна фаза (рис.6,а): передний фронт импульса тока не создавал вибраций, тогда как снижение тока сопровождалось сильной вибрацией и шумом. Это позволило сделать важный вывод о том, что главным источником шума и вибраций является задний фронт импульса тока.

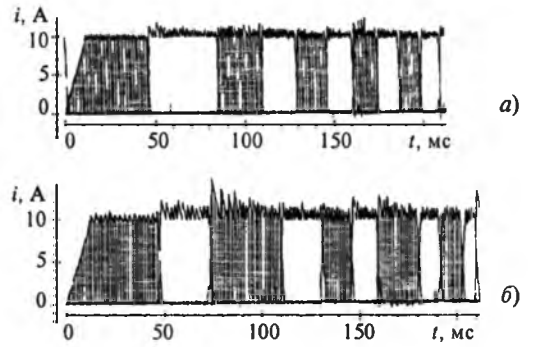


Рис.3. Токи ВИП с датчиком (а) и без датчика (б) положения ротора

Выявление источника шума позволило устранить вибрации и шум с помощью управления формой импульса тока: соответствующее затягивание заднего фронта импульса тока снизило шум и вибрацию до допустимого уровня, что показано на рис.6,б. На практике эта проблема решена на базе контроллера с процессором Intel 8xС196МН.

Устранение соответствующим управлением главных недостатков ВИП — датчика положения ротора и значительных шума и вибраций обеспечивает предпосылки для более широкого использования ВИП в различных ЭТС.

Для доказательства преимуществ технологии ВИП было проведено ее сравнение с альтернативным техническим решением — вентильным двигателем постоянного тока с постоянными магнитами для велосипеда.

Технические данные сравниваемых приводов приведены в таблице, общий вид двигателей показан на рис.7.

Таблица

Технические характеристики двух типов двигателей

Параметры двигателя	ВИД	ВДПМ (прототип)
Мощность номинальная, Вт	160	160
Напряжение номинальное, В	36,0	36,0
Потребляемый ток номинальный, А	7,0	6,8
Частота вращения номинальная, об/мин	160	160
Момент номинальный, Н·м	9,0	9,0
КПД, %	63	65
Масса активных материалов, кг	4,09	4,25
Постоянные магниты	Нет	Редкоземельные
Масса двигателя, кг	4,93	4,67
Длина сердечника, мм	40	40
Внешний диаметр двигателя, мм	157,5	165
Длина двигателя, мм	80	70
Относительная стоимость	0,3	1

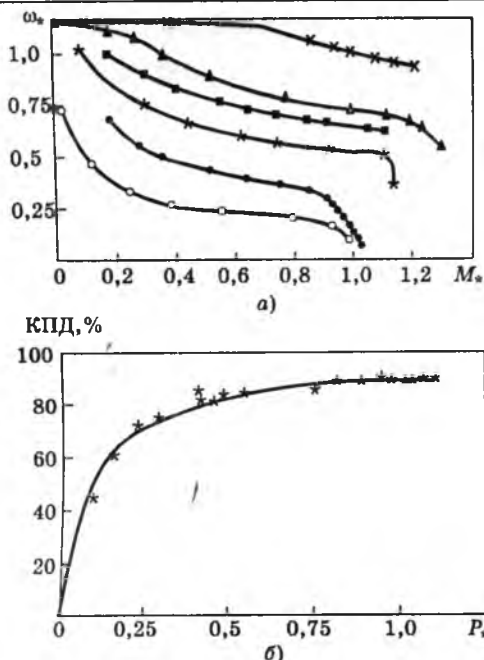


Рис.4. Характеристики ВИП

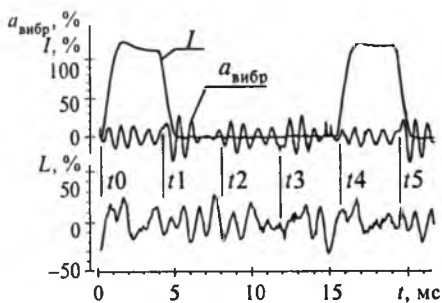


Рис.5. Спектр шума

Как видно из таблицы, образцы двигателей имеют практически одинаковые характеристики, важные для потребителя: размеры, массу, номинальную мощность и др., однако надежность, технологичность, ремонтпригодность, удобство утилизации и, что особенно важно, стоимость, существенно различаются.

Технология ВИП для ЭТС отличается от альтернативной технологии, построенной на основе вентильного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами: она значительно дешевле, более надежна, более удобна при производстве, эксплуатации, ремонте и утилизации. Устранение недостатков ВИП

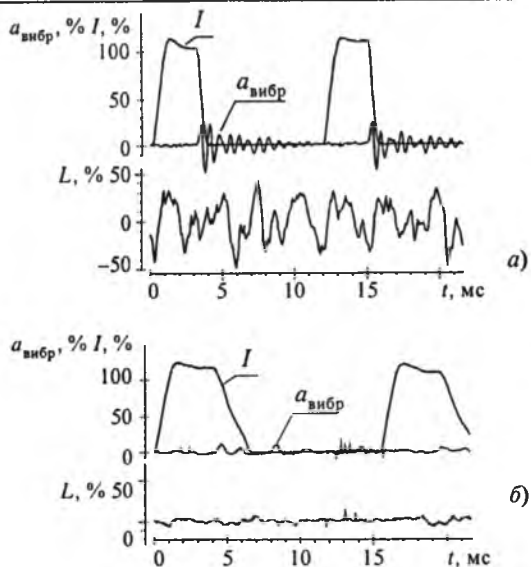


Рис.6. Вибрация и шум при работе одной фазы (а) и при управлении задним фронтом импульса тока (б)



Рис.7. Общий вид двигателей

— датчика положения ротора, значительного шума и вибраций вместе с созданной «know-how» открывает для этого типа привода новые возможности для выхода на широкий мировой рынок в виде мехатронных модулей ВИП для электрических транспортных средств.

Список литературы

1. Бычков М.Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода//Электричество. 1997. № 8. С. 35–44.
2. Бычков М.Г., Кисельникова А.В., Семенчук В.А. Экспериментальные исследования шума и вибраций в вентильно-индукторном электроприводе//Электричество. 1997. № 12. С. 41–46.
3. Ilinski N.F., Bitchkov M.G. Switched Reluctance Drive for Light EVS//The 16-th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS16): Beijing, 12-16 October, 1999.

Опыт разработки и применения асинхронных электроприводов с тиристорными преобразователями напряжения

МАСАНДИЛОВ Л.Б., АНИСИМОВ В.А., ГОРНОВ А.О., КРИКУНЧИК Г.А., МОСКАЛЕНКО В.В.

Отечественный и зарубежный опыт исследования, разработки и применения регулируемого электропривода (ЭП) переменного тока в течение нескольких десятилетий выделил два основных их вида — систему «тиристорный преобразователь (регулятор) напряжения — двигатель» (ТПН—АД) и систему «преобразователь частоты — двигатель» (ПЧ—АД). Система ПЧ—АД обладает лучшими регулировочными возможностями и экономична, система ТПН—АД более проста и имеет лучшие массогабаритные и стоимостные показатели.

При правильном выборе и допустимом управлении обе системы могут реализовать требуемые состояния координат движения исполнительных органов рабочих машин и механизмов. При этом система ПЧ—АД «не накладывает» ограничений на длительность этих состояний, а система ТПН—АД имеет жёсткие лимиты их длительности по потерям энергии и температуре элементов двигателя.

Это известное положение определяет устойчивую нишу применения системы ТПН—АД — повторно-кратковременные или кратковременные режимы приводимых машин и механизмов.

Последние годы выделили подкласс этой системы, предназначенный для управления пускотормозными режимами АД, — так называемые пусковые устройства.

Теоретические и практические разработки, связанные с параметрическим регулированием АД, на кафедре автоматизированного электропривода МЭИ начались в конце 50-х годов под руководством профессора М.М. Соколова [1—3].

Устойчивая тенденция применения регулируемых асинхронных ЭП повысила интерес к этому типу ЭП и выявила новые области его использования. Отличаясь простотой схемотехнической реализации и невысокими массогабаритными и стоимостными показателями (для ЭП мощностью от 20 кВт и более удельные масса и объём серийных ТПН лежат в пределах соответственно 0,2—0,4 кг/кВт и 0,25—0,5 дм³/кВт, а стоимость составляет порядка 10—20 дол/кВт), этот тип ЭП способен осуществить выполнение самых разнообразных технологических и эксплуатационных требований.

Важной областью практического применения результатов, полученных за эти годы при выполнении комплекса научно-исследовательских работ по системе ТПН—АД, являются общепромышленные и, преж-

де всего, грузоподъемные механизмы — крановые и лифтовые.

Приводные двигатели крановых и лифтовых механизмов работают в повторно-кратковременном режиме. При этом основную часть рабочего времени (60—70% и более) требуемая скорость АД близка к номинальной, а в течение примерно 5—15% времени она должна быть понижена. В процессе работы на высокой скорости АД может быть подключен непосредственно к сети. Следовательно, в течение большей части рабочего времени никакой преобразователь для питания АД не нужен. В течение же небольшой части рабочего времени управляемый преобразователь электрической энергии необходим как для обеспечения пониженной скорости ротора, так и для надлежащего формирования переходных процессов пуска и торможения. При работе на высокой скорости, т.е. при нулевом угле управления, тиристоры ТПН полностью открыты и сеть не загружается высшими гармониками. В случае же использования ПЧ при работе на высокой скорости возникают определенные проблемы, связанные с обеспечением генераторного режима с рекуперацией энергии в сеть, который является характерной особенностью привода подъемно-транспортных механизмов.

Представляется, что выбор рациональной системы электропривода для грузоподъемных механизмов зависит от режима механизма и разрешения противоречий между показателями качества этих систем. В тех многочисленных случаях, когда для крановых механизмов или лифтов достаточно получить установившиеся режимы с двумя уровнями скорости и сформировать требуемые переходные процессы, целесообразно выбрать тот преобразователь (ПЧ или ТПН), который лучше всего отработан в конструктивном плане, хорошо приспособлен к условиям эксплуатации, удобен и надежен в работе.

Углубление исследования системы ТПН—АД на основе сложных компьютерных и математических моделей позволили обосновать методы управления, расширяющие технические возможности этой системы за счёт специальных режимов — квазичастотного, шагового, импульсного.

В частности, для реализации квазичастотного управления (КЧУ) предложены алгоритмы и соответствующие способы и системы управления [4—6]. При осуществлении одного из способов [6] частоты значимых гармоник определяются соотношением:

$$f_v = \frac{f_{v1}(m_1+n_1)q_1 + f_{v2}(m_2+n_2)q_2}{(m_1+n_1)q_1 + (m_2+n_2)q_2},$$

где

$$f_{v1} = f_c \left[1 - \frac{T_c}{t_\tau} \frac{k_1}{m_1 + n_1} \right]; \quad f_{v2} = f_c \left[1 - \frac{T_c}{t_\tau} \frac{k_2}{m_2 + n_2} \right].$$

$m_1, n_1, q_1, m_2, n_2, q_2$ — параметры квазичастотного управления [4]; T_c — период сетевого напряжения; t_τ — минимальное время такта переключений при квазичастотном управлении; k_1, k_2 — целые числа, удовлетворяющие неравенству

$$k_1 q_1 + k_2 q_2 \leq 2[(m_1 + n_1)q_1 + (m_2 + n_2)q_2] \frac{t_\tau}{T_c}.$$

Частоту f_v значимой гармоники напряжения можно приблизить к любой заданной частоте в области между f_{v1} и f_{v2} . Тем самым на основе квазичастотного управления обеспечиваются стабильная пониженная скорость, регулирование момента в широком диапазоне с плавным переходом из двигательного режима АД в тормозной, электрическое торможение в определенной зоне скоростей в разомкнутой структуре ЭП. Вместе с тем квазичастотное управление имеет и недостатки, связанные с трудностью осуществления электрического торможения вблизи синхронной скорости и наличием повышенного шума и вибраций АД, что также накладывает определённые ограничения на длительность подобных режимов.

Рациональное сочетание фазового, квазичастотного и шагового режимов управления значительно расширяет функциональные возможности системы ТПН—АД. В сотрудничестве с ведущими предприятиями в области кранового и лифтового электрооборудования: ВНИПТИ ПО «Динамо», «ВНИИПТмаш», СКТБ башенного краностроения, АООТ «Электропривод», Карачаровский механический завод, ЦПКБ по лифтам и др. проведен ряд работ по внедрению систем ТПН—АД с комбинированным управлением.

Несмотря на известные трудности, кафедра проводит работы по внедрению системы ТПН—АД для электроприводов подъемно-транспортных машин:

- в содружестве с СКТБ башенного краностроения и Истринским филиалом ВЭИ разрабатываются электроприводы крановых механизмов подъема и передвижения, снабженных АД с фазным ротором, и электроприводы механизмов подъема и передвижения электрических талей, снабженных АД с короткозамкнутым ротором;

- в содружестве с Карачаровским механическим заводом проводится работа по модернизации электроприводов лифтов с двухскоростными асинхронными двигателями;

- в содружестве с АООТ «Электропривод» разрабатываются регулируемые электроприводы стан-

ков-качалок с использованием двухскоростных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Энергетический кризис 70-х годов активизировал во всём мире поиск путей энергосбережения. Естественно, что основное внимание в области электропривода было обращено на резервы энергосбережения в массовых, нерегулируемых по скорости электроприводах. Работы в этом направлении на кафедре АЭП были инициированы доц. Р.С. Сарбатовым и проводились проф. Н.Ф. Ильинским и сотрудниками лаборатории массового асинхронного ЭП.

Были разработаны принципы рационального применения ТПН для регулирования напряжения на статоре АД с целью минимизации его энергопотребления при данной нагрузке. Найдены количественные соотношения, определяющие оптимальный баланс активной и реактивной составляющих тока статора, обеспечивающий в заданных условиях минимизацию потерь. Разработаны методы определения условий целесообразности введения режимов энергосбережения, определяемых параметрами режима работы механизмов, параметрами АД и сети.

Показано, что эффективное использование электронных компонентов силовой и управляющей частей ТПН наиболее полно реализуется в рамках концепции ТПН с гибридной (тиристорно-контакторной) силовой частью на основе «полной» реализации ТПН как многофункциональных пусковых устройств [7,8].

Это развиваемое на кафедре АЭП направление использования ТПН связано с их применением в качестве пусковых устройств («мягких пускателей») для асинхронных ЭП мощностью 30—350 кВт. Разработана и с 80-х годов реализуется на практике концепция гибридного тиристорного пускателя. В схемах таких пускателей используется контактор, контакты которого включены параллельно парам тиристоров в каждую фазу питания двигателя. При пуске двигателя контактор отключён и требуемые кривые тока или момента формируются тиристорной частью пускателя.

После завершения пуска происходит автоматическое включение контактора, в результате чего двигатель подключается к сети. При отключении (торможении) двигателя размыкание контактов происходит в бездуговом режиме, что позволяет использовать в гибридных пускателях малогабаритные контакторы без дугогасительных устройств.

Пускатели с гибридной силовой частью имеют ряд преимуществ перед обычными пускателями, в которых тиристоры остаются в работе и в установившемся режиме и должны быть рассчитаны вместе с охладителями на длительный режим работы электропривода. Эти подтверждённые практикой преимущества состоят в следующем.

1. В качестве охладителей (теплоаккумуляторов) для тиристорных гибридных пускателей из-за кратковременности их работы могут использоваться токоподводящие шины или простейшие пластинчатые охладители, стоимость которых более чем на порядок ниже стоимости стандартных оребренных охладителей (радиаторов), а их применение позволяет существенно снизить общие массу и габарит пускателей [9].

По этой причине установка шунтирующего контактора не вызывает повышения массы и габарита гибридного пускателя. Так, разработанные МЭИ и ЗВИ гибридные пускатели типов МРН-М, БУ АЭК-2, Рипад-375 на проходные мощности 200—315 кВт (степень защиты IP 00) имеют удельные показатели в указанных пределах, которые соответствуют обычным пускателям типов PS D (фирма АВВ), SMC (фирма «Allen Bradley»), АТS-23 (фирма «Telemecanique»), ЭПУ1М (ЧЕАЗ) и др.

2. Для электроприводов в несколько сотен киловатт потери в тиристорах составляют несколько сотен ватт. При длительном режиме работы электроприводов рабочих машин и механизмов, например, насосов, компрессоров, вентиляторов, потери энергии становятся значительными, что снижает энергетические показатели электроприводов. Работа гибридных пускателей характеризуется в длительном установившемся режиме только потерями в катушке контактора, которые на порядок меньше потерь в тиристорах.

За счёт такого снижения потерь энергии и с учётом меньшей стоимости охладителей тиристорных установок шунтирующего контактора окупается в зависимости от режима работы электропривода и его мощности от нескольких сотен до 2—3 тыс. ч его работы. Так, для двигателя мощностью 110 кВт установка контактора типа ТКС-200 окупается за 1900 ч. По мере роста стоимости электроэнергии этот срок сокращается.

3. Использование гибридных пускателей повышает эксплуатационную надёжность электропривода, поскольку при выходе из строя тиристорной части включение и выключение двигателя могут осуществляться контактором до восстановления полной работоспособности схемы.

4. Наличие шунтирующего контактора замедляет процесс «расформировки» тиристорных под длительным действием приложенного напряжения.

5. В ряде случаев удаётся снизить номинальные параметры тиристорных, так как они не работают (шунтированы) в установившемся режиме, но полностью использовать их нагрузочные возможности во время импульсной пусковой нагрузки. При этом пониженной проходной мощности тиристорных оказывается

достаточно для снижения потерь в режиме холостого хода при разгрузках механизма.

Опыт теоретических и экспериментальных исследований показал, что статические и динамические свойства ЭП с ТПН с двигателями повторно-кратковременного номинального режима работы и общепромышленных серий существенно различаются. Это проявляется, в частности, в возникновении неустойчивых режимов на линейном участке механической характеристики в разомкнутой системе.

Возможность возникновения колебательных режимов усложняет настройку системы и её адаптацию к заданному режиму работы. Поэтому для этой области применения ТПН потребовались специальные алгоритмы управления и схемотехнические решения. Были разработаны методы линеаризации характеристик ТПН при работе на АД и специальные схемы синхронизации.

Анализ специфики работы механизмов длительного режима, условий их пуска и возможностей ТПН позволил реализовать множество нетрадиционных решений, существенно снижающих интенсивность токовых, электромагнитных, термических и механических нагрузок в механизмах, передачах, двигателе, сетях и коммутационной аппаратуре.

Функциональные возможности системы ТПН—АД применительно к механизмам длительного режима работы иллюстрируют табл. 1, 2, 3.

Положительные эффекты, связанные с формированием пусковых режимов АД мощностью более 100 кВт, определяют интерес к пусковым устройствам с позиций повышения надёжности механизмов, передач, двигателей, питающих сетей. К настоящему времени пусковые устройства, разработанные МЭИ, совместно с ЗВИ внедрены на многих рабочих машинах и механизмах, среди которых шаровые мельницы, штамповочные прессы, вентиляционные установки различного назначения, вибропогрузатели, транспортные тележки, градирни, сушильные устройства и другие, имеющие мощность от единиц до нескольких сотен киловатт. Их применение позволило решить многие специфические задачи, связанные с повышением качества выполнения технологических операций, эксплуатационной надёжности технологического оборудования и самого ЭП.

В последние годы пусковые устройства стали широко использоваться в ЭП насосных установок, принося заметный технико-экономический эффект. Так, их применение в ЭП канализационных насосов (мощность ЭП от 30 до 160 кВт, количество установок около 100) позволило исключить гидравлические удары в трубопроводе при пуске и останове насосов и повысить частоту их пусков. Использование пусковых устройств для ЭП насосов второго подъёма в

Таблица 1

Функционально-эксплуатационные эффекты	Способ реализации в системе ТПН
Снижение коммутационных нагрузок на релейно-контактные аппараты и питающие линии	Обеспечение бестоковой коммутации релейных аппаратов за счет синхронизации переключений с режимом тиристорного регулятора
Снижение «просадок» напряжения в линиях питания при пусках приводов мощностью более 100 кВт и нагруженных трансформаторах	Пуск в режиме стабилизации тока статора на уровне 3—4 номиналов
Предотвращение перегрева АД при повышенных напряжениях из-за роста тока ХХ	Стабилизация напряжения на АД в структуре с обратной связью по напряжению
Минимизация энергопотребления при изменении статической нагрузки (непрерывно, дискретно) до уровней $M_c < 0,4 M_n$	Регулирование напряжения на АД с целью оптимизации скольжения, $\cos \varphi$ или минимизации тока статора
Снижение нагрева АД при работе от сети с несимметричным напряжением	Поканальное (пофазное) управление ТПН с обратной связью по напряжению
Симметрирование токов в фазах АД при параметрической несимметрии	Поканальное (пофазное) управление ТПН с обратной связью по току
Ограничение тока статора (потребления из сети) при работе в области номинальных скольжений	Управление напряжением в системе с обратной связью по току с отсечкой
Выравнивание тока или момента в многодвигательных системах	Управление напряжением в системе с обратной связью по току с перекрестными связями
Подавление максимальных значений пусковых моментов АД, снижение динамических механических нагрузок	Пофазное подключение АД к сети или задание плавного нарастания напряжения на статоре
Подавление максимальных моментов при повторных включениях или реверсе АД	Детерминированное подключение АД с учетом взаимного положения векторов ЭДС и напряжения сети
Снижение темпа роста температур внутренних элементов АД, снижение термических напряжений	Пуск с контролем «времятокового коридора», контролем тока и времени пуска
Снижение и контроль линейных токов при пуске	Пуск с обратной связью по току с отсечкой
Стабилизация температуры или сушка обмоток АД при увлажнении двигателей, работающих при повышенной влажности	Поддержание заданной мощности тепловыделений при неподвижном АД
Ограничение темпа пуска или момента при пуске АД	Пуск с обратной связью по току или моменту
Обеспечение заданного положения механизма при пуске	Обеспечение шагового режима АД в импульсном или векторном режиме управления
Форсирование повышенного среднего момента АД в режиме низких скоростей (повышение момента при трогании)	Обеспечение квадратичного или импульсного режима АД при полных скольжениях
Позиционирование механизма при остановке	Кратковременное снижение скорости в фазовом или квазичастотном режиме перед окончательной остановкой привода
Обеспечение эксклюзивного закона пуска механизма	Адаптация (тренировка) задающего устройства в конкретных условиях пуска с последующим воспроизведением его программным устройством
Увеличение числа допустимых пусков привода подряд	Пуски с ограничением токов, затяжкой времени пуска с целью исключения местных перегревов конструкции АД
Замедление торможения механизма	Обеспечение торможения с активным моментом, меньшим момента статической нагрузки
Ускорение торможения привода в технологических или аварийных режимах	Задание режима постоянного тока в обмотках статора (динамического торможения)
Кратковременное снижение скорости механизма	Снижение скорости в разомкнутой или замкнутой по скорости системе

системах водоснабжения (мощность ЭП до 350 кВт, количество более 50 штук), кроме исключения гидравлических ударов, позволило реализовать групповое регулирование расхода воды.

Современные условия рынка требуют быстрой реакции на запросы потребителя. Лаборатория асинхронного ЭП массовых механизмов кафедры АЭП продолжает совершенствовать конструкцию ТПН и гибридных

пусковых устройств для более быстрой адаптации ЭП к разнообразным условиям эксплуатации.

Список литературы

1. Чиликин М.Г., Соколов М.М., Шинянский А.В. Асинхронный электропривод с дросселями насыщения. М.: Энергия, 1964.
2. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе / М.М. Соколов, Л.П. Петров, Л.Б. Масандилов, В.А. Ладензон. М.: Энергия, 1967.

Защитные функции	Способ реализации в системе ТПН
От перегрева элементов силовой части привода	Отключения по сигналам датчиков температуры, установленных в обмотках АД, на охладителях тиристоров, в подшипниковых узлах АД
От длительных и максимальных токовых перегрузок	Отключение по специальному «бестоковому» алгоритму при нарушении допустимой время-токовой зависимости
От работы при несимметричном питании АД	Оценка несимметрии фазовых напряжений, запрет пуска или отключение
От включения при неправильном чередовании фаз на зажимах АД	Блокирование пуска при нарушении чередования фаз
Защита от возможности перегрева при больших отклонениях напряжения от U_n (при $U < U_n$ за счет роста $I_{\text{акт}}$, при $U > U_n$ за счет роста $I_{\text{реакт}}$)	Работа с жесткой обратной связью по напряжению
Защита от работы при аномальных режимах механизма	Прием сигналов от соответствующих датчиков и переход в режим плавного торможения
От работы при снижении параметров изоляции	Формирование тест-сигналов по оценке сопротивления изоляции

Таблица 3

Диагностика	Способ реализации в системе ТПН
Оценка параметров ХХ механической части	Сравнение токов при ХХ механизма с номинальными установками или времени пуска с номинальным
Оценка состояния подшипников АД	Анализ составляющих тока ХХ АД в сравнении с их значениями в начале эксплуатации
Оценка производительности механизма	Вычисление активной мощности механической мощности и работы АД по информации от датчиков тока и напряжения АД, оценка КПД
Информация о нагрузке механизма	Контроль воспроизводимости времени пуска и номинальной токовой диаграммы запуска

3. Соколов М.М., Масандилов Л.Б. Измерение динамических моментов в электроприводах переменного тока. М.: Энергия, 1975.

4. Масандилов Л.Б., Гетман Ю.И., Мелихов В.Л. Особенности квазичастотного управления асинхронного двигателя // Электротехника. 1994. № 5—6. С. 16—20.

5. А.с. 1097156 СССР. Устройство для управления преобразователем переменного напряжения асинхронного двигателя / Ю.В. Рожанковский, Л.Б. Масандилов, Н.Р. Степаня и др. // Открытия. Изобретения. 1985. № 18.

6. А.с. 1376212 СССР. Способ регулирования скорости асинхронного электропривода / Л.Б. Масандилов, Ю.В. Рожанковский, Н.В. Крылов // Открытия. Изобретения. 1988. № 7.

7. Анисимов В.А., Горнов А.О., Рожанковский Ю.В. Особенности тиристорных преобразователей напряжения для электроприводов механизмов массового применения // Промышленная энергетика. 1990. № 3. С. 19—23.

8. Горнов А.О., Москаленко В.В., Анисимов В.А. и др. Развитие функциональных возможностей асинхронных электроприводов с параметрическим управлением для рабочих машин и механизмов массового применения // Электротехника. 1995. № 10. С. 27—29.

9. Анисимов В.А., Горнов А.О., Москаленко В.В. Повышение эффективности асинхронных электроприводов с тиристорными регуляторами напряжения // Приводная техника. 1997. № 2.

Разработки шагового электропривода на кафедре АЭП МЭИ

БАЛКОВОЙ А.П., СЛИВИНСКАЯ Г.А., ЛУЦЕНКО В.Е.

Шаговые электроприводы широко применяются в системах позиционирования и контурного движения. Среди этих электроприводов есть как дешевые традиционные системы с поворотными двигателями и простым программным управлением, так и высокоточные безредукторные многокоординатные приводы сложных технологических установок с развитыми системами управления с обратными связями.

Исследования шагового электропривода в МЭИ 40 лет назад были начаты группой молодых инженеров (Б.А. Ивоботенко, В.К. Цаценкиным, Л.А. Садовским и др.) под руководством профессоров А.А. Сиротина и затем М.Г. Чиликина. По их первым результатам были разработаны отрезки серий шаговых электродвигателей с блоками управления и налажен их выпуск рядом отечественных предприя-

тий. С начала 70-х годов под руководством профессора Б.А. Ивоботенко лабораторией дискретного электропривода кафедры АЭП проведены фундаментальные исследования систем движения с шаговым электроприводом, результатом которых явилось создание целого класса технологических устройств и комплексов с качеством движения в пространстве деталей и инструмента, которое не достигалось ни одним иным типом электропривода. В наибольшей степени это относится к системам движения с линейными и многокоординатными шаговыми электроприводами, позволившими, например, на порядок улучшить качество автоматизированных устройств при производстве элементов микроэлектроники и изделий с их применением. Работам лаборатории дважды присуждалась Государственная премия СССР.

Данная статья представляет развитие этих исследований с использованием теории цифрового управления, новых средств процессорной техники и силовой электроники. В статье даны примеры разработок разомкнутого привода с микрошаговым управлением, замкнутого шагового привода и указаны перспективные, по мнению авторов, направления развития этого типа электропривода.

Разомкнутый шаговый электропривод

Среди шаговых двигателей (ШД) наибольшее применение благодаря лучшему использованию объема машины по моменту нашли двигатели с постоянным магнитом на роторе и большим количеством зубцов на роторе и статоре. В отечественной литературе этот тип машины получил название «магнитоэлектрический индукторный ШД» [1]. В западной литературе этот тип двигателя называют «гибридным ШД». Далее рассмотрены электроприводы именно с такими двигателями.

Структура разомкнутого шагового привода приведена на рис.1. Разомкнутый привод использует программный режим работы с расчетом синусно-косинусных токов, создающих момент двигателя, необходимый для выполнения движения и фиксации в заданной позиции. Программа движения привода $\theta_r, \omega_r, \mu_r$ (путь, скорость, момент) рассчитывается генератором траектории по модели привода. Положение привода задается положением γ годографа вектора

тока, задание скорости — частотой ω_r токов, а ускорение — фазовыми сдвигами годографа вектора тока. Формирование токов, создающих близкий к программному момент μ , обеспечивается инвертором с аналоговым регулятором и широтно-импульсным модулятором (ШИМ).

Разомкнутый шаговый привод описывается упрощенной системой уравнений в относительных величинах на базе известного подхода [1]:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \omega; \quad \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{\mu}{j};$$

$$\mu = \mu_m(\omega_r) \sin(\gamma - \theta - \varphi(\omega)) - \omega\beta(\omega) + \mu_d + v, \tag{1}$$

где θ — электрическая координата подвижной части привода; ω — электрическая скорость; τ — время; μ — момент; $j = j_{mot} + j_L$ — момент инерции двигателя и нагрузки; $\mu_m(\omega_r)$ — амплитуда момента; γ — задание угла вектора тока; $\varphi(\omega)$ — угол запаздывания вектора тока, вызванного индуктивностью двигателя, инерционностью регулятора тока и дискретизацией управления; $\beta(\omega)$ — коэффициент демпфирования, возникающего в основном из-за вихревых потерь; $\mu_d = -\mu_d \sin 4\theta$ — возмущение в виде фиксирующего момента двигателя; v — неучтенное возмущение; индекс "r" означает заданную величину.

Закон движения разомкнутого шагового привода обеспечивается программированием момента в соответствии с (1), т.е. программированием амплитуды $i_{rm} = \mu_{rm}$, фазы γ и частоты ω_r годографа вектора тока.

Амплитудное управление (программирование амплитуды i_{rm}) с постоянным углом нагрузки ($\gamma - \theta - \varphi(\omega)$) малоэффективно, так как на его качестве сильно сказывается отрицательное влияние насыщения магнитной цепи двигателя и фиксирующего момента, так влияние насыщения проявляется в нелинейном изменении момента в функции тока, что эквивалентно появлению дополнительных возмущений, а фиксирующий момент, слабо зависящий от тока двигателя, создает, в свою очередь, зоны параметрической неустойчивости при амплитудном управлении с малыми значениями токов.

При фазовом управлении насыщение и фиксирующий момент влияют значительно слабее. Поэтому

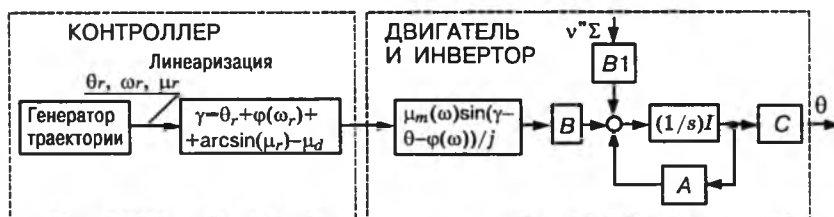


Рис.1. Структура разомкнутого шагового электропривода

(μ_c), вычисляемой регулятором по сигналу ошибки X_0 вектора состояния. Расчет ошибки вектора состояния ведет цифровой наблюдатель по сигналу датчика положения. За счет применения дополнительной локальной обратной связи по положению шаговый двигатель приобретает свойства бесконтактного двигателя постоянного тока (БДПТ) с практически постоянным в широком диапазоне скоростей моментом. Контур регулирования тока выполняется аналогично варианту разомкнутого привода.

Уравнение замыкания в режиме БДПТ, в отличие от (2), имеет вид:

$$\gamma = \theta + \varphi(\alpha r) + \arcsin(\mu_r + \mu_c) \quad (4)$$

С учетом из (3) и (4) замкнутый привод описывается системой уравнений (5):

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \omega; \quad \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{\mu(nh)}{j} + v_\Sigma; \quad \mu(nh) = \mu_r(nh) + \mu_c(nh);$$

$$v_\Sigma = \frac{(-\omega\beta(\omega) + \mu_d + v)}{j}, \quad (5)$$

где v_Σ — ошибка по ускорению.

Структура регулятора

Алгоритм регулятора, осуществляющего коррекцию, строится из системы уравнений:

$$\frac{dx_1}{d\tau} = x_2; \quad \frac{dx_2}{d\tau} = u_c + x_3; \quad \frac{dx_3}{d\tau} = x_4; \quad \frac{dx_4}{d\tau} = v_\Sigma^*;$$

$$v_\Sigma^* = \frac{d^2 v_\Sigma}{d\tau^2}; \quad u_c = \frac{\mu_c}{j}; \quad y = x_1, \quad (6)$$

где $x_1 = \theta$, $-\theta$ — ошибка по положению, $x_2 = \omega$, $-\omega$ — скоростная ошибка, x_3 — ошибка по ускорению.

При импульсном управлении из этих уравнений получается следующая система уравнений (см. [2]):

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u_c(k); \quad y(k) = Cx(k), \quad (7)$$

где

$$\Phi = \exp(Ah) = \begin{vmatrix} 1 & h & h^2/2 & h^3/6 \\ 0 & 1 & h & h^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

$$\Gamma = \int_0^h \exp(As) B ds = \begin{vmatrix} h^2/2 \\ h \\ 0 \\ \theta \end{vmatrix}; \quad C = [1 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Корректирующее воздействие регулятора

$$\mu_c = -Lx = -l_1 x_1 - l_2 x_2 - l_3 x_3 - l_4 x_4.$$

Отсюда характеристический полином регулируемой системы

$$\det(zI - \Phi + \Gamma L) = (z-1)^2(z^2 + b_1 z + b_2). \quad (8)$$

Здесь b_1 и b_2 — линейные функции l_1 и l_2 . Выбор регулятора сводится к выбору параметров b_1 и b_2 , откуда вычисляются l_1 и l_2 ; при этом l_3 и l_4 можно выбирать произвольно. Можно принять $l_3=1, l_4=0$, тогда возмущение, если бы его можно было бы измерить, не влияет на поведение системы. Для определения b_1 и b_2 можно выбрать колебательное звено $s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2$ с подходящими свойствами. Параметры соответствующей дискретной системы вычисляются, как показано в [2]:

$$b_1 = -2 \exp(-\zeta_p \omega_p h) \cos(\omega_p h (1 - \zeta_p^2)^{1/2});$$

$$b_2 = \exp(-2\zeta_p \omega_p h). \quad (9)$$

Структура наблюдателя

Так как из всех составляющих вектора состояния при наличии датчика положения можно измерить только ошибку по положению, остальные компоненты вектора состояния должны вычисляться наблюдателем. Пусть θ измеряется в момент времени $nh-h_1$, где h_1 — период цифроаналогового преобразования и задержки на вычисления. Новое значение задания угла вектора тока фиксируется в момент nh .

Тогда оценки вектора состояния для разных моментов времени внутри периода квантования описываются уравнениями:

$$x_0((n+1)h-h_1) = \Phi x_0(nh-h_1) + \Gamma_2 u(nh) + \Phi_2 \Gamma_1 u((n-1)h) + K(y(nh-h_1) - Cx_0(nh-h_1)); \quad (10)$$

$$x_0((n+1)h) = \Phi_1 x_0(nh-h_1) + \Gamma_1 u(nh),$$

где $x_0(T)$ — оценка вектора состояния в момент T :

$$\Phi_k = \exp(Ah_k) = \begin{vmatrix} 1 & h_k & h_k^2/2 & h_k^3/6 \\ 0 & 1 & h_k & h_k^2/2 \\ 0 & 0 & 1 & h_k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad (11)$$

$$\Gamma_k = \int_0^{h_k} \exp(As) B ds = \begin{vmatrix} h_k^2/2 \\ h_k \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad K = \begin{vmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{vmatrix}; \quad k=1,2; \quad h_2 = h-h_1.$$

Тогда ошибки оценивания:

$$x((n+1)h-h_1) - x_0((n+1)h-h_1) = \Phi(I-KC)(x(nh-h_1) - x_0(nh-h_1)); \quad (12)$$

$$x_r((n+1)h) - x_0((n+1)h) = \Phi_1 \Phi (I-KC) \Phi_1^{-1} (x_r(nh) - x_0(nh)).$$

Характеристический многочлен наблюдателя — многочлен четвертой степени, который можно представить в виде произведения двух многочленов второй степени, каждый из которых описывает колебательное звено:

$$\det(Iz - \Phi(I-KC)) = \det(Iz - \Phi_1 \Phi (I-KC) \Phi_1^{-1}) = (z^2 + b_{01}z + c_{01})(z^2 + b_{02}z + c_{02}). \quad (13)$$

Задав параметры колебательных звеньев, можно вычислить составляющие матрицы K наблюдателя с помощью системы уравнений:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= m_1; k_2 = m_2/h; k_3 = m_3/h^2; k_4 = m_4/h^3; \\
 m_4 &= f_4; m_3 = f_3 - 3/2 m_4; m_2 = f_2 - 2/3 m_4 - m_3; \\
 m_1 &= f_1 - m_4/6 - m_3/2 - m_2; \\
 f_1 &= 4 + b_{01} + b_{02}; \\
 f_2 &= 2 + b_{01} + c_{01} + b_{02} + c_{02} + (2 + b_{01})(2 + b_{02}); \\
 f_3 &= (1 + b_{01} + c_{01})(2 + b_{02}) + (1 + b_{02} + c_{02})(2 + b_{01}); \\
 f_4 &= (1 + b_{01} + c_{01})(1 + b_{02} + c_{02}).
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Реализация замкнутого шагового привода

Описанная методика проектирования замкнутого шагового привода была использована при разработке электропривода перемещения ультразвуковой сварочной головки машины для приваривания выводов микросхем. Перемещение сварочной головки происходит в плоскости и создается якорем планарного шагового двигателя (рис.3). Якорь этого двигателя содержит якоря трех линейных (X, Y1, Y2) шаговых двигателей, размещенных ортогонально. Такая конструкция двигателя повышает устойчивость к разворотам, вызванным случайными возмущениями и асимметрией двигателя. Индуктор (статор) двигателя выполнен из стальной пластины с ортогональной нарезкой. Двигатель оснащен магнито-воздушными опорами, что исключает трение и износ механических узлов. Осевой двигатель X обеспечивает перемещения по оси X, осевые двигатели Y1 и Y2 обеспечивают перемещения по оси Y и компенсацию разворачивающих возмущающих усилий. Для достижения высокой точности позиционирования и значительных ускорений двигатель снабжен оптическим растровым датчиком. Типовое перемещение привода — 2 мм по одной из осей, время перемещения — не более 25 мс. После каждого перемещения выполняется сварка. Система управления электропривода построена на базе 32-разрядного сигнального процессора с плавающей точкой TMS320C31.

Рассматриваемый привод решает типичную позиционную задачу с минимальным временем позиционирования. Поэтому при разгоне осевые двигатели

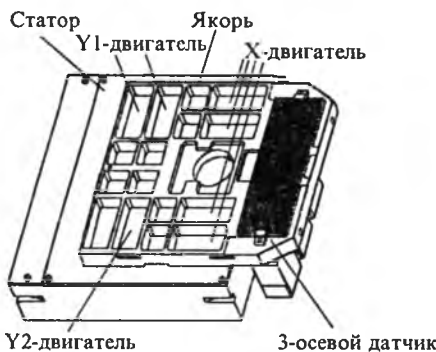


Рис.3. Планарный шаговый двигатель с датчиком положения

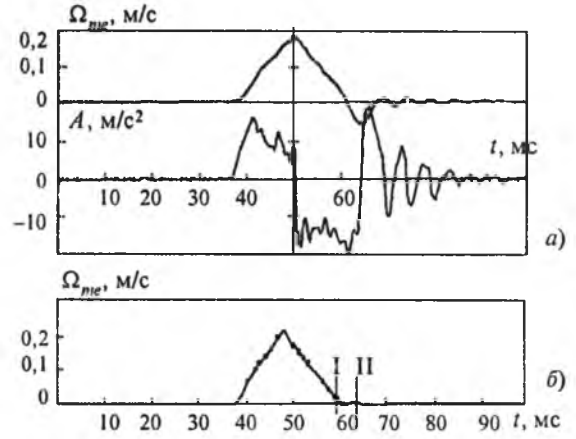


Рис.4. Графики скорости при перемещении планарного привода по оси X на 2,5 мм с амплитудным (а) и фазовым (б) управлением (I — время установления в коридоре ±5мкм, II — ±1мкм)

работают с максимальным ускорением без коррекции по координатам X и Y, а при торможении реализуют графики скорости, близкие к линейным. Корректирующее воздействие на фазе торможения и позиционирования вычисляется регулятором по информации наблюдателя. Параметры колебательных звеньев, используемых при расчете контроллера и наблюдателя, определяются из следующих соображений.

Суммарное управляющее воздействие $\mu_r + \mu_c$ модулю не может быть больше 1. При этом большие значения $|\mu_r|$ приводят к большему быстродействию привода, а большие значения $|\mu_c|$ обеспечивают быструю реакцию на возмущения. Для уменьшения колебательности коэффициенты демпфирования для всех звеньев регулятора и наблюдателя были выбраны равными 0,8. Период квантования при управлении тремя осями равнялся 100 мкс. Частоты собственных колебаний замкнутой системы по каждой оси и колебательных звеньев наблюдателя: $\omega_p = 1300 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{01} = 4000 \text{ с}^{-1}$, $\omega_{02} = 50 \text{ с}^{-1}$. При этих параметрах запас по углу равен 37° , запас по амплитуде — 13 дБ.

Можно сравнить результат применения амплитудного управления с ПИД-регулятором (рис.4,а) с результатом использования фазового управления (рис.4,б). Применение фазового управления существенно снижает длительность переходного процесса при позиционировании.

Достигнутые характеристики привода с фазовым управлением

- Максимальное ускорение, не менее 2G
- Погрешность позиционирования, мкм, не хуже 1
- Путевая ошибка при скорости 0,5 м/с, мкс, не хуже 15
- Время установления в коридор +/-5 мкм при позиционировании, мс 23

Перспективные структуры управления и конструкции шагового привода

Дальнейшим развитием структуры шагового электропривода с цифроаналоговым управлением становится шаговый электропривод с цифровым векторным управлением. При этом возможны, как и ранее, две структуры привода: без датчика положения и с ним.

Первый вариант базируется на получившем в последнее время распространение принципе «бездатчикового управления» [7]. В бездатчиковом приводе определение необходимых для векторного управления механических координат осуществляется с помощью цифровой модели привода по измеренным электрическим переменным (ток, напряжение). При этом малое полюсное деление ШД и векторный режим управления обеспечивают высокую параметрическую точность (до единиц угловых минут) и высокие ускорения привода (до сотен тысяч радиан в секунду). Особенно актуально применение бездатчикового управления в планарных приводах с ходом до нескольких метров, где использование датчиков положения затруднено. Композиции на базе планарных двигателей с бездатчиковым управлением, например, типа ТРИПЛАНАР [4] могут быть использованы в системах лазерной или водяной струйной обработки, для окраски или шлифования асферических контуров.

Применение в шаговом приводе цифрового векторного управления совместно с датчиком положения дополнительно увеличивает точность, обеспечивает максимально достижимый момент двигателя,

быструю реакцию на возмущения, автоматическую адаптацию к изменениям параметров двигателя и нагрузки, а также самодиагностику.

При использовании векторного управления и некоторых новых решений в конструкции планарного двигателя возможно достижение следующих показателей, например в приводе сварочной машины:

Двигатель	Конструкция без направляющих воздушные опоры; трехосевой датчик положения
Ход (X×Y), мм	100×100
Максимальное усилие, Н	1000
Максимальное ускорение с нагрузкой 2 кг, G.....	10—14
Погрешность позиционирования, мкм	±1

Список литературы

1. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями/Под ред. М. Г. Чиликина. М.: Энергия, 1971.
2. Остром К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ: Пер. с англ. М.: Мир, 1987.
3. Obermeier C. Modelling of a permanent magnet disk stepper motor and sensorless field oriented control using an extended Kalman filter//Proc. of the 2-nd International Conference Power Electronics & Drive Systems, PEDS, Singapore, May 1997. P. 714—721.
4. Toepper St., Kuhlbusch W., Lueckel J., Moritz W. Mechatronischer Entwurf der neuen Maschine TRIPLANAR fuer hochgenaue Fertigungs-und Messaufgaben//44th International Scientific Colloquium Technical University of Ilmenau, 1999. P. 86—91.

Новый контроллер для встроенных применений в системах управления приводами переменного тока

КОЗАЧЕНКО В.Ф., ОБУХОВ Н.А., ВЕСЕЛОВ М.В.

Описан новый контроллер, созданный на кафедре АЭП МЭИ и предназначенный для систем управления приводами переменного тока. Наличие универсальных интерфейсов позволяет быстро создавать на его основе эффективные и мощные системы векторного управления асинхронными, индукторными и вентильно-индукторными приводами.

В настоящее время подавляющее большинство уже установленных регулируемых приводов работают от постоянного тока. Можно уверенно констатировать тот факт, что современный регулируемый электропривод переходит на двигатели переменного тока. Регулируемые приводы постоянного тока остаются и в некоторых применениях являются незаменимыми, но в общем область их использования значительно снижается из-за появления большого числа новых приводов переменного тока, построенных на базе различных типов двигателей (асинхронных, индук-

торных, вентильно-индукторных). Это стало возможным благодаря бурному развитию электроники за последние несколько лет. Сейчас современная элементная база позволяет реализовывать те алгоритмы управления двигателями переменного тока, которые были разработаны ещё 30 лет назад, но не могли быть использованы в то время.

Развитие регулируемого электропривода происходит на фоне увеличения спроса на него и ужесточения требований, предъявляемых к современному электроприводе. Это можно объяснить огромным

количеством выпускаемых в настоящее время электродвигателей (по приблизительным подсчётам около 7 млрд. в год), которые являются основным потребителем электроэнергии в мире (электродвигатели потребляют порядка 70% всей вырабатываемой в мире электроэнергии). На фоне борьбы за экологию и сохранение мировых энергоресурсов во многих развитых странах были приняты законы, требующие ограничения потребления электроэнергии и обязательного применения энергосберегающих технологий (например, в США к 2001 г. планируется снизить общее потребление электроэнергии на 30%). С другой стороны, развитие электропривода связано с развитием новой техники и новых технологий. Современные устройства и технологии требуют от электропривода повышения точности движения (как в статике, так и в динамике), быстроедействия, надёжности, эффективности привода (КПД), понижения вносимых приводом искажений в сетевое напряжение. Необходимо также отметить, что в настоящее время в некоторых задачах, в которых ранее по ряду причин традиционно применялся гидравлический или пневматический привод, наблюдается переход на электропривод за счёт его более высокой надёжности, гибкости и экономичности. Сейчас регулируемый электропривод широко применяется в таких областях как транспорт (приводы главного движения для электро-транспорта, активная подвеска, гидроусилители руля, стеклоподъёмники, привод люков, фар), бытовая техника (стиральные машины, холодильники, кондиционеры, вентиляторы), источники питания (бесперебойные источники питания, источники питания повышенной частоты), промышленные приводы (станочные приводы, насосы, дозаторы, вентиляторы, подъёмники, лифты, транспортёры, рольганги, моталки и т.д.).

Развитие электроники и создание новых полупроводниковых устройств сделали возможным решение поставленных выше задач. За последние 2-3 года появилось большое количество новых устройств как силовой, так и управляющей электроники, предназначенных конкретно для решения задач электропривода. При этом обозначилось достаточно сильное снижение цен на электронику. На этом фоне к современным приводам предъявляют всё более жёсткие стоимостные требования. Поэтому в данных условиях современный электропривод должен обладать рядом дополнительных функциональных возможностей, обеспечивающих управление небольшим количеством дискретной технологической автоматики и обработку сигналов разнообразных технологических датчиков, повышая интеграцию и уменьшая стоимость. Современный электропривод обязательно должен иметь возможность интеграции его в более крупную систему управления. На сегодняшний момент это требование является обязательным для промышленных приводов, которые обычно находятся на

нижнем уровне комплексной автоматизации производственного процесса.

В современных условиях стало очевидно, что аналоговые системы управления приводами не могут удовлетворить потребности рынка и реализовать требуемые характеристики электропривода. На место аналоговых систем управления приходят цифровые, применение которых обусловлено тем, что:

— цифровое управление по сравнению с традиционным аналоговым управлением позволяет увеличить надёжность, эффективность и гибкость системы управления;

— цифровое управление позволяет перейти к использованию безколлекторных электрических машин и использовать преимущества данных двигателей;

— цифровое управление позволяет широко использовать вентильно-индукторные двигатели (SRD), которые завоёвывают всё большую популярность за счёт своей простоты, дешевизны и возможности более простой утилизации;

— цифровое управление на базе мощных микроконтроллеров позволяет применять бездатчиковые методы управления в массовых изделиях;

— цифровое управление на базе мощных микроконтроллеров позволяет применять алгоритмы векторного управления электродвигателями;

— цена изделия заставляет снижать цену системы управления, что требует применения интегрированной электроники.

В соответствии с указанными выше требованиями, предъявляемыми к современному электроприводу и системе его управления, на кафедре автоматизированного электропривода МЭИ в лаборатории микропроцессорных систем управления был разработан новый микропроцессорный контроллер МК8.1. Контроллер предназначен для создания систем управления промышленными приводами переменного тока. Наличие универсальных интерфейсов позволяет быстро создавать на его основе эффективные и мощные системы векторного управления асинхронными, индукторными и вентильно-индукторными приводами. Преобразователи частоты на его основе могут быть успешно использованы в металлургических, тяговых и станочных приводах.

Данная разработка обобщила многолетний опыт работы сотрудников нашей лаборатории в области построения цифровых систем управления приводами. В новой разработке был учтён обширный опыт, накопленный не только в нашей лаборатории, но и во всём мире. Контроллер МК8.1 построен на современной элементной базе, доступной всем желающим. Он обладает мощной вычислительной способностью и гибкой периферией, предназначенной для эффективного управления двигателями. Микропроцессорный контроллер МК8.1 позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления двигателями — векторное управление с обратной связью по положению или

бездатчиковое векторное управление. При этом контроллер обладает достаточной гибкостью, позволяющей ему легко адаптироваться к различным схемам построения силовой части электропривода.

Контроллер МК8.1 был разработан в рамках создания новой серии преобразователей частоты для управления асинхронными короткозамкнутыми двигателями с векторным управлением. Преобразователи частоты с векторным управлением можно использовать в различных промышленных устройствах, требующих более широкого и точного регулирования различных электромеханических или технологических параметров (тяговые приводы, моталки, лифты, станочные приводы и т.д.). Кроме того, данный контроллер используется для модернизации существующей серии преобразователей частоты АРДН, предназначенной для управления асинхронными двигателями насосов и дозаторов. Серия преобразователей частоты АРДН нашла широкое применение в сфере коммунального хозяйства для автоматизации систем контроля химического состава воды и регулирования давления в системах центрального водоснабжения зданий. Хотелось бы отметить, что разработанный контроллер является достаточно универсальным устройством, на базе которого можно создавать системы управления не только преобразователями частоты, но и другими устройствами, например, источниками бесперебойного питания.

Ядром контроллера является новый DSP-микроконтроллер ADMC300, выпускаемый фирмой «Analog Devices». Выбор данного микроконтроллера не случаен. За последние годы многие крупные фирмы, производящие полупроводниковые электронные устройства, предложили новые микросхемы, предназначенные для построения мощных и эффективных систем управления двигателями. Это касается как силовой, так и управляющей электроники. Но на рынке управляющей электроники более ярко проявился интерес полупроводниковых фирм к направлению motor control (управление двигателями). На данный рынок вышли новые фирмы, которые до этого не занимались выпуском устройств, предназначенных для управления двигателями. Среди них «Analog Devices» и «Texas Instruments». Эти фирмы предложили новые микроконтроллеры, предназначенные для применения в области управления двигателями (motor control), которые позволили разработчикам начать проектирование совершенно новых, эффективных систем управления. Указанные микроконтроллеры построены на базе DSP-микропроцессоров этих фирм и позволяют достаточно просто реализовывать сложные алгоритмы управления двигателями. Необходимо отметить, что до этого момента открыто предлагаемые микроконтроллеры из области motor control (например, фирмами «Intel», «Motorola», «Siemens») не обладали требуемой вычислительной мощностью для реализации систем век-

торного или бездатчикового управления приводами переменного тока. Для этих целей разработчикам приходилось использовать многопроцессорные решения, состоящие из мощного центрального процессора, выполняющего все основные вычисления, необходимые для реализации алгоритмов векторного управления, и специализированного сопроцессора (или микроконтроллера), реализующего управление силовыми ключами и интерфейс с датчиками. Такое многопроцессорное решение значительно удорожает и усложняет систему управления, снижает её надёжность. Поэтому, такие решения находили очень ограниченное применение в промышленности. Кроме того, существовали закрытые разработки некоторых фирм, которые использовались самими фирмами для построения подобных систем и были недоступны другим разработчикам.

Как показывает анализ, проведённый сотрудниками нашей кафедры [1—4], в настоящее время наиболее перспективными в области управления двигателями являются 2 серии DSP-микроконтроллеров: серия ADMCxxx фирмы «Analog Devices» и серия TMS32x24x фирмы «Texas Instruments». Обе серии содержат в настоящее время по несколько микроконтроллеров, отличающихся друг от друга быстродействием, интегрированной периферией и, конечно же, ценой. Многообразие представленных серий объясняется желанием фирм-производителей наиболее широко охватить рынок систем управления. Обе серии хорошо и подробно рассмотрены в периодической печати [1—4], поэтому нет смысла повторяться. Они сравнимы между собой и имеют свои собственные достоинства и недостатки, не позволяющие выделить среди них явно лучшую или худшую. По ряду причин при разработке нового контроллера в качестве его ядра был выбран микроконтроллер фирмы «Analog Devices» ADMC300. Это можно объяснить следующими причинами. Во-первых, перед началом разработки контроллера МК8.1, на кафедре имелся определённый опыт применения микроконтроллеров серии ADMCxxx в системах управления электроприводами, так как средства разработки для микроконтроллеров ADMCxxx появились в продаже раньше соответствующей продукции фирмы «Texas Instruments». Во-вторых, в тот момент это был самый мощный (в смысле вычислительной способности) микроконтроллер из обеих серий. В-третьих, архитектура микроконтроллера ADMC300 наилучшим образом подходит для создания недорогих систем векторного управления.

Остановимся чуть подробнее на архитектуре микроконтроллера ADMC300 (рис.1). Микроконтроллер состоит из процессорного ядра, построенного на базе процессора ADSP-2171, интегрированной на том же кристалле памяти (2 килослово кодового ПЗУ, 4 килослово кодового ОЗУ, 1 килослово ОЗУ данных) и набора периферийных устройств, таких как:

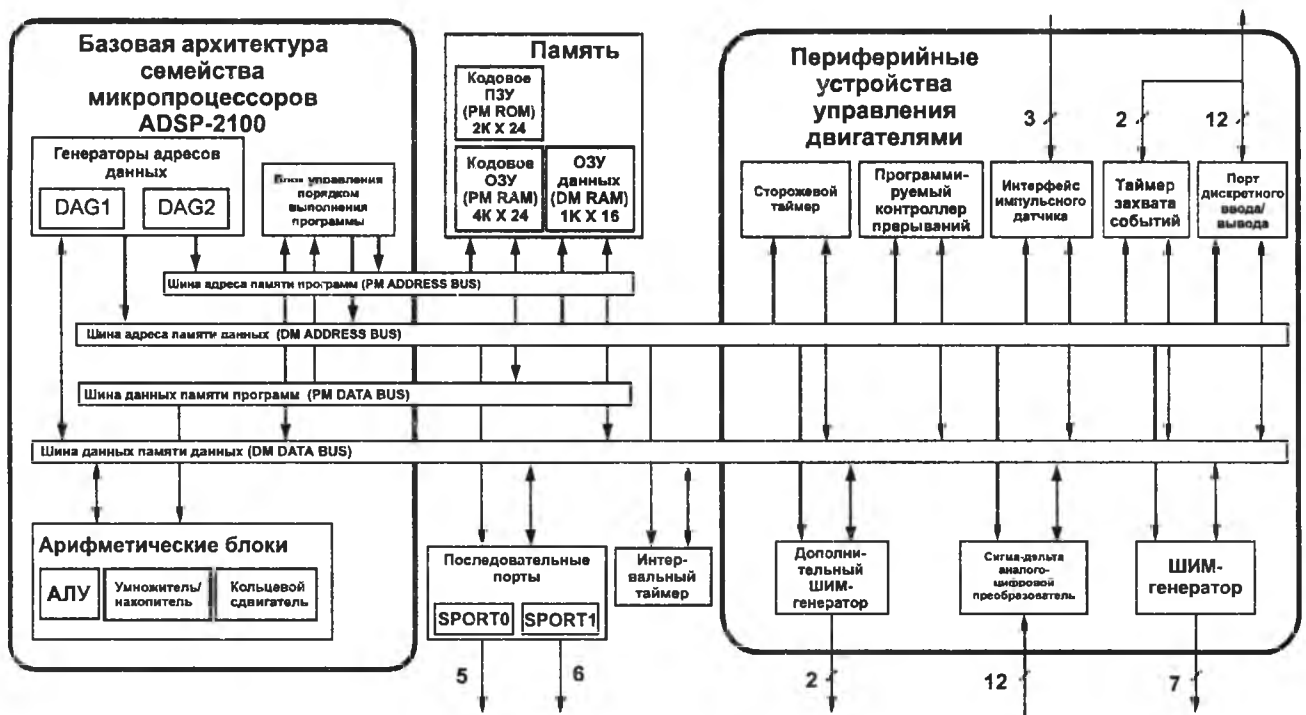


Рис.1. Архитектура микроконтроллера ADMC300

— трёхканальный 16-битовый ШИМ-генератор с режимами двукратного обновления параметров сигнала за период ШИМ;

— пятиканальный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь;

— источник опорного напряжения 2,5 В (точность 2%);

— 12-битовый порт дискретного ввода/вывода;

— двухканальный модуль захвата импульсных сигналов;

— интерфейс с импульсными датчиками положения и скорости;

— два дополнительных таймера, генерирующие ШИМ-сигналы высокой частоты;

— сторожевой таймер.

Данная архитектура имеет ряд достоинств, определивших применение микроконтроллера ADMC300 в разработанной системе МК8.1:

— высокая производительность центрального процессора;

— удобный, интуитивно понятный ассемблер с алгебраической формой записи команд;

— встроенная библиотека (записанная во внутреннем ПЗУ микроконтроллера) наиболее часто используемых математических и специальных функций, оптимизированная для векторного управления двигателями, в том числе для реализации прямых и обратных фазных и координатных преобразований;

— эффективная система обработки сигналов импульсного датчика положения, включающая в себя дополнительные аппаратные средства точной идентификации скорости в широком диапазоне;

— высокоточный и производительный модуль ввода аналоговых сигналов, оптимизированный для решения задач прямого управления моментом двигателей переменного тока, в том числе с возможностью запуска и получения результата преобразования по выбранному каналу за один цикл обращения к регистру результата;

— малое число выводов в корпусе (80), существенно упрощающее разводку платы и повышающее ее надежность.

Как бы не был хорош микроконтроллер ADMC300, он один не может осуществлять управление приводом, так как требуется обеспечить интерфейсы микроконтроллера с управляемым оборудованием и датчиками.

Универсальный контроллер МК8.1 представляет собой многослойную печатную плату (габаритные размеры 110×120 мм), интеллектуальным ядром которой является DSP-микроконтроллер ADMC300, производимый фирмой «Analog Devices».

На рис.2 представлена структурная схема контроллера, показаны взаимосвязи между всеми, а также интерфейсные возможности.

Перечислим функциональные возможности контроллера МК8.1 и его особенности.

— *Высокая вычислительная способность процессора* (24 MIPS) позволяет реализовывать сложные алгоритмы управления двигателями (например, векторное управление, в том числе и бездатчиковое), создавать замкнутые по скорости и положению системы управления с большими диапазонами регулирования (для высокоточных станочных приводов).

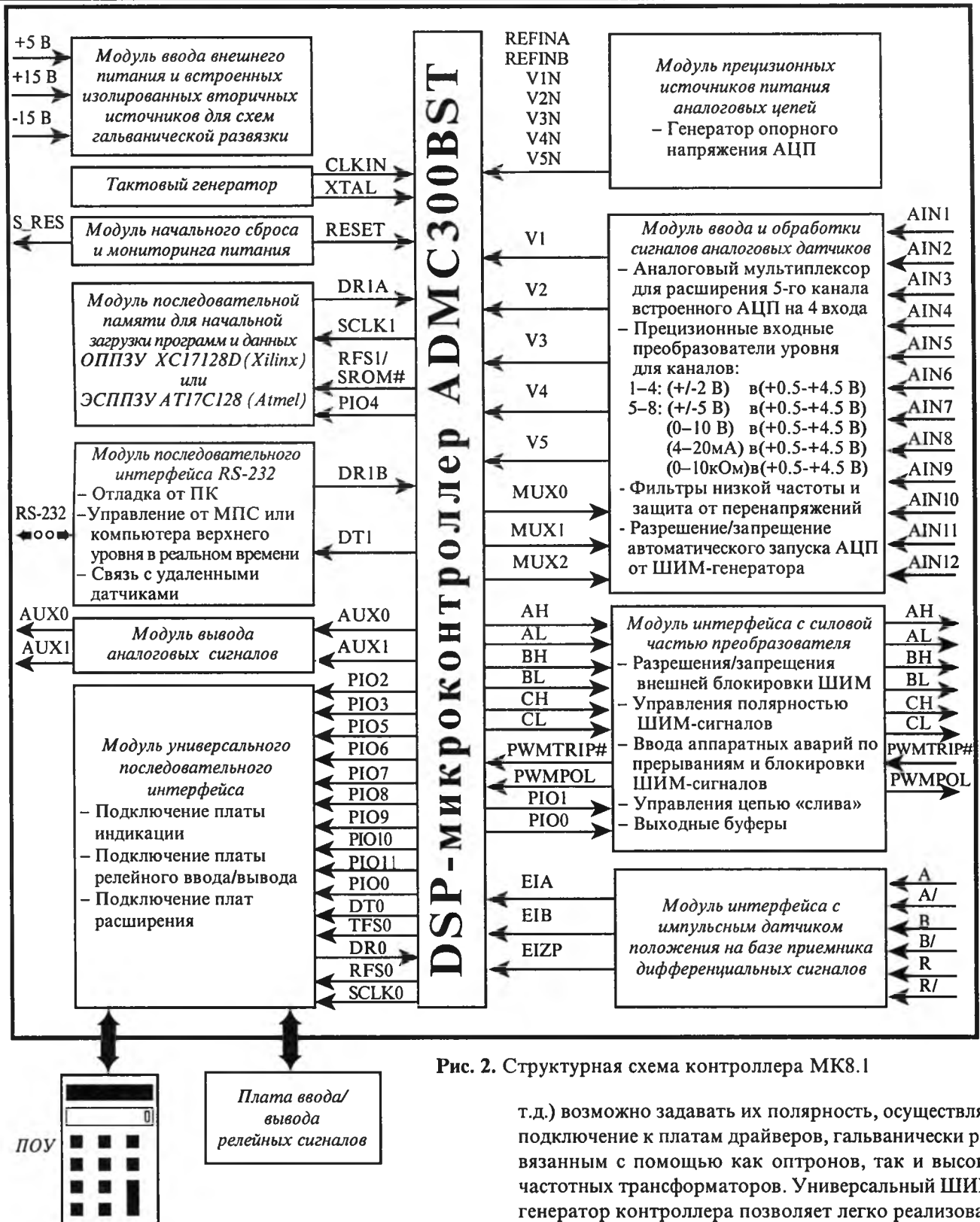


Рис. 2. Структурная схема контроллера МК8.1

— Универсальный интерфейс с трёхфазным инвертором напряжения позволяет управлять силовыми устройствами, построенными по различным схемам и на различной элементной базе. Наряду с частотными параметрами ШИМ-сигналов (несущая частота ШИМ, скважность сигнала, «мёртвое» время и

т.д.) возможно задавать их полярность, осуществлять подключение к платам драйверов, гальванически развязанным с помощью как оптронов, так и высокочастотных трансформаторов. Универсальный ШИМ-генератор контроллера позволяет легко реализовать различные виды широтно-импульсной модуляции, такие как векторная, симметричная синусоидальная и т.д.

— Интерфейс для принятия внешнего сигнала аварии инвертора или какого-либо другого оборудования с последующей его аппаратной блокировкой и быстрой программной обработкой произошедшей аварийной ситуации.

— Блок аналоговых входов, позволяющий эффективно подключать сигналы обратных связей и состоящий из двух групп по 4 аналоговых входа в каждой:

1) 4 независимых аналоговых входа с диапазоном измеряемых сигналов $-2 \div +2\text{В}$, измерения по всем каналам могут производиться одновременно; данная группа входов предназначена для подключения сигналов от внутренних датчиков управляемого устройства;

2) 4 мультиплицированных универсальных аналоговых входа с индивидуально выбираемыми диапазонами измеряемых сигналов $-5 \div +5\text{ В}$, $0—10\text{ В}$, $0—5\text{ мА}$, $4—20\text{ мА}$, по одному каналу возможно подключение внешнего резистора $0—10\text{ кОм}$. Измерения могут производиться только по одному из четырёх каналов в конкретный момент времени; данные входы могут быть использованы для подключения как внутренних сигналов (датчики, сигналы задания), так и внешних аналоговых сигналов пользователя (с датчиков технологических величин, например); наличие достаточно широкого набора форматов внешних аналоговых сигналов даёт пользователю возможность простого подключения к системе управления большого ряда датчиков.

— Контроллер обладает парой дополнительных ШИМ-сигналов с фиксированной несущей частотой $48,8\text{ кГц}$ и диапазоном изменения скважности сигнала $0—96,6\%$. Данные ШИМ-сигналы могут быть использованы для организации простейших цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) и вывода с их помощью сигналов на аналоговые индицирующие приборы.

— Наличие 8 линий дискретного ввода/вывода (5В CMOS , 100мкА) позволяет пользователю реализовать интерфейс с дискретными устройствами. Все линии могут быть настроены как на вывод дискретных сигналов, так и на их приём. Кроме того, любая линия может быть настроена индивидуально на принятие внешнего прерывания по переднему или заднему фронту, по высокому или низкому уровню сигнала. Также имеется возможность настроить любую линию на принятие сигнала аварии управляемого оборудования (например, инвертора) с автоматической аппаратной блокировкой выходов ШИМ-генератора.

— Интерфейс с импульсными сигналами позволяет осуществлять захват двух различных частотно- или широтно-модулированных сигналов с временным разрешением от 80нс до $5,243\text{мс}$. Данные функции мультиплицированы с 2 (из 8) линиями дискретного ввода/вывода.

— Интерфейс с импульсными датчиками даёт возможность подключения к системе управления квадратурных импульсных датчиков положения или скорости с использованием 3-х сигнальных линий (два квадратурных сигнала плюс реперный). Сигналы могут быть как дифференциальными в диапазоне —

$15 \div +15\text{В}$, так и непосредственные квадратурные сигналы в диапазоне $0 \div +5\text{В}$.

— Модуль энергонезависимой памяти объёмом до 512 байт позволяет хранить информацию о настройках режимов работы устройства или истории его работы (для реализации режимов блокировки самопроизвольного включения устройства после пропадания питания и т.п.).

— Последовательный интерфейс RS-232 обеспечивает возможность подключения контроллера к ведущей системе, которой может являться персональный компьютер. Такое подключение может обеспечить не только возможность построения иерархических, многоуровневых систем управления, но и локальную настройку устройства от переносного компьютера.

— Универсальный последовательный интерфейс позволяет расширить функциональные возможности контроллера за счёт подключения ограниченного числа дополнительных плат.

Перечисленных возможностей, реализованных в новом контроллере МК8.1, достаточно для решения большинства задач управления конкретным устройством. Но многие применения достаточно уникальны по задачам сопряжения управляющего устройства с окружающим его оборудованием. Поэтому для расширения функциональных возможностей контроллера МК8.1 имеется универсальный последовательный интерфейс, по которому к нему может быть подключена плата, выполняющая какую-либо недостающую функцию. Примером такой платы может служить плата релейного ввода/вывода, плата RD-конвертора, осуществляющая интерфейс контроллера с датчиком положения типа вращающийся трансформатор, плата цифроаналоговых преобразователей, плата сетевого интерфейса (например, CAN) и т.п. Подключаемые платы могут быть уникальными для каждой конкретной задачи и выполнять практически любые функции. Допускается подключение других процессорных плат по любому из последовательных интерфейсов, если по каким-либо причинам один контроллер не может справиться со всеми задачами управления устройством.

Так как основным применением контроллера МК8.1 является управление преобразователем частоты для асинхронного короткозамкнутого двигателя, то кроме процессорной платы для решения основной задачи были созданы плата дискретного ввода/вывода и плата интерфейса с пользователем, необходимые в подобных устройствах и учитывающие их требования. Плата дискретного ввода/вывода обеспечивает:

— 8 релейных входов типа «сухой контакт»;

— 7 релейных выходов (нормально замкнутый и нормально разомкнутый контакт с общим выводом для каждого выхода) с возможностью коммутации переменного напряжения 220В и тока 10А .

Плата интерфейса с пользователем (пульта управления) обеспечивает:

— индикацию параметров работы привода (частота, ток, напряжение, потребляемая мощность, КПД, коэффициент мощности двигателя);

— выбор и индикация режимов работы двигателя (направление и частота вращения, индикация аварии привода);

— выбор различных настроек привода, предварительно записанных в энергонезависимую память;

— запуск и останов привода.

Индикация выполнена на пяти семисегментных индикаторах, на которые информация (текущий параметр работы привода, выбираемый вручную) выводится в динамическом режиме. Плата интерфейса с пользователем позволяет осуществлять только управление преобразователем частоты. Для настройки параметров (например, интенсивности разгона/торможения и т.п.), которые записаны в энергонезависимой памяти на процессорной плате, используется персональный компьютер, подключаемый по интерфейсу RS-232. Вместо персонального компьютера настройки привода можно изменить систему управления верхнего уровня, подключаемую по тому же интерфейсу или через переходник по дифференциальному интерфейсу RS-485. Кроме того, контроллеры МК8.1 могут объединяться в крупные распределённые системы управления через интерфейсы RS-485 или CAN. В таком случае контроллер будет осуще-

ствлять управление приводом в соответствии с командами, поступающими от устройств управления более высокого уровня (например, промышленных контроллеров или промышленных ПК).

В настоящее время на кафедре автоматизированного электропривода заканчивается отладка программного обеспечения новых преобразователей частоты, построенных на базе контроллера МК8.1. Затем начнётся промышленный выпуск преобразователей частоты на Заводе биомедицинского приборостроения РАН (г. Пущино). Заказы на изготовление и поставку контроллеров принимаются (тел. 361-71-51, тел/факс 362-71-65).

Список литературы

1. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам//Chip News. 1999. №1. С. 2—9.
2. Козаченко В.Ф., Соловьёв А.Н. Новые микроконтроллеры фирмы «Analog Devices» ADMC300/330 для высокопроизводительных систем векторного управления электроприводами переменного тока//Chip News. 1998. №5. С.16—21.
3. Грибачёв С., Козаченко В. Новые микроконтроллеры фирмы «Texas Instruments» TMS320x24x для высокопроизводительных систем встроенного управления электроприводами//Chip News. 1998. №11—12. С. 2—6.
4. Веселов М.В., Соловьёв А.Н. Семейство DSP-микроконтроллеров фирмы «Analog Devices» для встроенных систем управления двигателями//Chip News. 1999. №1. С.17—23.

Развитие частотно-регулируемого асинхронного электропривода на кафедре АЭП МЭИ

КУДРЯВЦЕВ А.В.

Показаны основные этапы работы и результаты по созданию частотно-регулируемых электроприводов на основе преобразователей частоты с автономными инверторами напряжения и тока.

Для проведения НИР по созданию частотно-управляемого асинхронного электропривода на основе транзисторного преобразователя частоты в структуре организованной в 1958 г. межфакультетской Проблемной лаборатории электромеханики была создана группа частотно-регулируемого электропривода, научным руководителем которой был утвержден Абрам Соломонович Сандлер.

На первом этапе работы (1958—1962 гг.) был создан транзисторный преобразователь частоты (ПЧ) с автономным инвертором напряжения (АИН) для управления высокоскоростными асинхронными двигателями (АД).

Второй этап работ начался в 1962 г., когда в СССР было освоено опытно-промышленное производство тиристоров. На их основе были разработаны тиристорные ПЧ с АИН для высокоскоростных АД с амплитудным регулированием напряжения и для АД единой серии с широтно-импульсным регулиро-

ванием напряжения. На этом же этапе решались основные теоретические вопросы, возникающие при анализе электромагнитных и электромеханических процессов в системе ПЧ—АД и проектировании промышленных ЭП с частотным управлением [1—6].

Уже в 1969 г. для осваиваемого в серийном производстве Куйбышевским заводом координатно-расточных станков трехшпиндельного координатно-шлифовального станка был разработан тиристорный частотно-регулируемый ЭП (частота вращения электрошпинделей от 12000 до 96000 мин⁻¹).

В 1973 г. началась работа по созданию быстродействующих реверсивных частотно-регулируемых ЭП, выполненных на основе автономного инвертора тока (АИТ), целью которой было создание векторной системы регулирования, обеспечивающей управление моментом АД в динамических и статических режимах. В результате этой работы был создан ЭП, предназначенный для механизма подъема пла-

вучего крана. В системе был использован принцип ориентирования вектора тока статора АД по вектору потокосцепления ротора. Испытания системы ЭП проводились в бездатчиковом варианте и с датчиком частоты вращения (при диапазоне регулирования 100:1) в лаборатории кафедры АЭП и на испытательном полигоне ПО «Динамо» [8].

В это же время для электронной промышленности были разработаны и освоены в серийном производстве высокоскоростные ЭП технологических испытательных ультрацентрифуг (установки Ц20.000, 12МЦ30.000, 12МЦ125.000) с фактором линейного ускорения от 1000g до 125000g, которые обеспечили минимизацию времени цикла испытаний. Для машиностроительной промышленности в 1974 г. был разработан и введен в эксплуатацию ЭП стенда для испытания высокоскоростных насосов. Оснащенный ПЧ мощностью 100 кВ·А с дискретно-аналоговой системой регулирования стенд обеспечивал точность поддержания частоты вращения испытуемых насосов с погрешностью не более 0,05% и максимальную частоту вращения 60000 мин.

Началом третьего этапа можно считать 1979 г., когда в группе частотного регулирования кафедры АЭП начали разрабатывать микропроцессорные системы управления (МПСУ). Необходимые для этого условия были обеспечены освоением в серийном производстве советской электронной промышленностью однокристальных 16-разрядных микропроцессоров 1801ВМ2. Реализация векторного управления в цифровой системе регулирования существенно упростила аппаратную часть. Быстродействующий частотно-регулируемый ЭП с прямым цифровым управлением в 1989 г. был испытан на механизме подъема башенного крана, подтвердив высокие технико-экономические показатели.

Подводя итоги первых трех этапов работ по созданию частотно-регулируемых ЭП на кафедре АЭП МЭИ, можно заметить, что значительные усилия в этой области к концу 80-х годов все-таки не привели к широкому распространению частотно-регулируемых ЭП в промышленности и других областях.

В зарубежной практике уже в конце 70-х годов наметилась тенденция перехода на транзисторные ПЧ в диапазоне мощностей до 20—30 кВт, что стало возможным с появлением высоковольтных (до 1000 В) биполярных транзисторов при токах коллектора до 100 А. Это привело к постепенному расширению областей применения регулируемого ЭП переменного тока. В середине 80-х годов заметно возрос интерес к частотно-регулируемому ЭП и в нашей стране.

Четвертый этап работ в группе частотного регулирования кафедры АЭП МЭИ начался в 1988 г., когда отечественная промышленность освоила производство биполярных транзисторов в модульном исполнении 2М2-40-8 и 2М2-80-8 (напряжение до 800 В, ток коллектора 40 и 80 А) и стало возможным создание

транзисторных ПЧ до мощности 15 кВт. В 1992 г. стали доступны импортные транзисторные модули с изолированным затвором (IGBT-модули), которые зарубежными фирмами, работающими в области преобразовательной техники, используются с конца 80-х годов. Появление IGBT-модулей позволило резко упростить силовую часть ПЧ, уменьшить массу и габариты ПЧ и их стоимость, т.е. создало предпосылки для действительно широкого применения частотно-регулируемого ЭП.

В 1993 г. в группе частотного регулирования началась разработка транзисторных ПЧ на IGBT-модулях для ЭП общепромышленных механизмов и высокоскоростных технологий для АД мощностью от 5 до 45 кВт. Первые испытания ПЧ мощностью 10 кВт проходили в 1993 г. В конце 1994 г. был изготовлен опытный образец ПЧ мощностью 20 кВ·А [8].

Первая промышленная партия этих ПЧ в составе комплексного ресурсосберегающего устройства (КЭУ) была введена в эксплуатацию в МР «Лефортово» в 1995 г. [10].

Выпускаемое Опытным заводом МЭИ КЭУ предназначено для использования частотно-регулируемых асинхронных ЭП общепромышленных механизмов, в первую очередь в ЭП насосов и вентиляторов, и позволяет регулировать частоту вращения АД в диапазоне 15:1.

В зарубежной практике 90-е годы отмечены выпуском очень широкой номенклатуры транзисторных ПЧ, отвечающих практически любым требованиям потребителей этой продукции: диапазон мощностей от единиц до сотен киловатт, развитые диалоговые системы общения, высокая точность регулируемых частоты вращения и момента АД в статических и переходных процессах, возможность идентификации подключенного АД и адаптации параметров АД при его нагреве, работа в бездатчиковой системе или с аналоговыми и дискретными датчиками и т.д. Продуманная и отработанная конструкция, отличный дизайн, надежность и разумная стоимость современных ПЧ привели к тому, что к середине 90-х годов частотно-регулируемый ЭП в развитых странах стал действительно массовым.

В нашей стране положение иное. В разработках самих ПЧ, как и во все прошедшие с конца 50-х годы, отставание в настоящее время можно оценить на уровне 5—10 лет. Основной причиной этого является отставание все прошедшие годы отечественной электронной промышленности, которая практически является базовой для разработок и силовой части, и систем регулирования ПЧ. Большие надежды на уменьшение такого отставания связаны сейчас с резким увеличением числа научных коллективов, которые в 90-е годы начали заниматься вопросами разработки частотно-регулируемых ЭП и собственно ПЧ. Кроме того, сильно упростился доступ к информационным материалам ведущих фирм и появилась

возможность в случае необходимости использовать современные импортные изделия электронной промышленности. Отечественная промышленность освоила выпуск вполне современных электролитических конденсаторов на напряжение 400 В емкостью 3300 мкФ, начат выпуск на российских предприятиях IGBT-модулей.

Однако рынок частотно-регулируемых ЭП отсутствует. Большое число потенциальных потребителей или не имеют средств, или не проявляют интереса к экономии ни электроэнергии, ни ресурсов (воды или тепла), нерационально расходуемых на их производствах или в их организациях. Отдельные случаи применения частотно-регулируемых ЭП вызваны, как правило, неэкономическими причинами.

В этих условиях потенциальные производители частотно-регулируемых ЭП не могут себе позволить инвестировать средства в производство ПЧ, и выпуск ПЧ растет медленно. Кроме того, производство такой продукции, как современные ПЧ, требует определенного уровня технологий монтажных работ, применения современных конструкционных материалов, особенно пластмасс, культуры дизайнерских и конструкторских работ, наличия современных комплектующих и, наконец, определенного уровня квалификации, необходимого как для наладки произведенных ПЧ, так и для их гарантийного и послегарантийного обслуживания.

Опыт показывает, что названные причины приводят к выбору одного из трех способов производства в нашей стране частотно-регулируемых ЭП.

1. Использование в ЭП готовых импортных ПЧ.
2. Разработка и освоение в производстве ПЧ на основе импортных комплектующих.
3. Разработка и освоение в производстве ПЧ с минимально возможным применением импортных комплектующих.

Очевидно, что все эти способы в настоящее время не только полезны, но и необходимы, так как, во-первых, одна из основных задач — сделать частотно-регулируемый асинхронный ЭП привычным и распространенным для потребителей, показав, какие выгоды можно получить при модернизации самых массовых нерегулируемых пока асинхронных ЭП, и, во-вторых, только при конкуренции со стороны ведущих мировых фирм, производящих ПЧ, чрезвычайно активно занимающих сегодня наш рынок электротехнических изделий, можно надеяться на прогресс в разработке и особенно в производстве современных отечественных ПЧ.

Вместе с тем очевидно также, что научные коллективы, имеющие или набирающие опыт в разработке и проектировании ПЧ для частотно-регулируемых ЭП, наибольшее внимание уделяют созданию отечественных ПЧ.

По областям применения в ЭП ПЧ можно условно разделить на две группы. Первая группа ПЧ пред-

назначена для использования в ЭП, работающих в длительном режиме и обеспечивающих на регулируемых характеристиках поддержание технологического параметра, задаваемого программно. Эта группа ЭП наиболее массовая: ЭП насосов, вентиляторов, транспортеров и других общепромышленных механизмов. В них целесообразно применение недорогих, простых ПЧ, не имеющих аппаратной и программной избыточности, которые легко вводятся в эксплуатацию и не требуют для обслуживания высококвалифицированного персонала.

Вторая группа ПЧ используется в ЭП станков, технологических линий и т.п., т.е. в устройствах, имеющих относительно сложные алгоритмы управления, выполняемые в автоматическом или ручном режимах. ПЧ этой группы должны иметь развитое программное обеспечение и аппаратные средства, облегчающие диалог пользователя с ПЧ: удобные встроенные пульты для местного управления и систему программируемых входов-выходов для дистанционного управления, набор укрупненных пользовательских программ, возможность изменения структур регулирования ЭП, средства диагностики и контроля и т.п.

Разработке и внедрению ПЧ и первой, и второй групп на кафедре АЭП МЭИ уделяется большое внимание. Первая группа ПЧ представлена преобразователем частоты, который в составе КЭУ применялся в ЭП насосных станций водоснабжения зданий еще в 1995 г. В настоящее время Опытный завод МЭИ выпускает модернизированный ПЧ этого типа, а на кафедре АЭП продолжают работы над созданием более совершенной МПСУ и ее программного обеспечения на сравнительно простых и дешевых современных микроконтроллерах. ПЧ второй группы с улучшенными функциональными возможностями, предназначенные для решения задач комплексной автоматизации технологических процессов [11], используют современные быстродействующие микроконтроллеры, позволяющие реализовать сложные алгоритмы прямого цифрового управления частотно-регулируемых ЭП.

Список литературы

1. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Частотное регулирование асинхронных двигателей. М.: Энергия, 1966.
2. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Преобразователи частоты для управления асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1966.
3. Сандлер А.С., Гусяцкий Ю.М. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией. М.: Энергия, 1968.
4. Преобразователи частоты на тиристорах для управления высокоскоростными двигателями/ Сандлер А.С., Аввакумова Г.К., Кудрявцев А.В., Никольский А.А. М.: Энергия, 1970.
5. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. М.: Энергия, 1974.
6. Электрощпиндели для внутреннего шлифования/ Сандлер А.С., Аввакумова Г.К., Кудрявцев А.В., и др. М.: Машиностроение, 1977.

7. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе /Бернштейн А.Я., Гусяцкий Ю.М., Кудрявцев А.В., Сарбатов Р.С. М.: Энергия, 1980.

8. Гусяцкий Ю.М. Синтез быстродействующей системы частотно-управляемого асинхронного электропривода// Электричество. 1982. № 10.

9. Преобразователи частоты для регулируемого электропривода широкого применения/ Кудрявцев А.В., Богаченко Д.Д., Ладыгин А.Н. и др.//Электротехника. 1994. № 7.

10. Ильинский Н.Ф. Преобразователи частоты в энергосберегающем электроприводе насосов. Доклады научно-практического семинара: «Преобразователи частоты в современном электроприводе». М.: МЭИ, 1998.

11. Кудряшов В.К., Козаченко В.Ф., Остриров В.Н., Усов Н.Н. Опыт внедрения и перспективы производства отечественных преобразователей частоты//Доклады научно-практического семинара: «Преобразователи частоты в современном электроприводе». М.: МЭИ, 1998.

СЛЕДЯЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С МАЛЫМ ПЕРЕДАТОЧНЫМ ЧИСЛОМ РЕДУКТОРА ДЛЯ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ

ОВСЯННИКОВ Е.М., ЦАЦЕНКИН В.К.

На основе сравнительного анализа редукторных и безредукторных следящих электроприводов с вентильными двигателями делается вывод о преимуществах безредукторного привода для высокоточных систем наведения. Показано, что в определенных случаях удовлетворительные результаты можно получить при использовании редуктора с малым передаточным числом.

Системы наведения антенных установок радиотелескопов и станций космической связи, технологических гелиоустановок космического базирования, оптико-электронных, астрономических и аналогичных устройств содержат следящие электроприводы, характеризующиеся малыми погрешностями воспроизведения заданных законов движения при относительно высоких значениях ускорений и скоростей исполнительных осей опорно-поворотных устройств. Одновременно масса и размеры подвижных полезных нагрузок оказываются значительными, приводя к повышенным значениям моментов инерции относительно исполнительных осей.

Возможности улучшения точностных и динамических показателей на существующей элементной базе широко применяемых следящих электроприводов с высокоскоростными двигателями и редукторами в составе систем наведения практически исчерпаны. Неравномерность хода, ограниченная жесткость и люфт редуктора, повышенный износ деталей, работающих на высоких скоростях, вызывают потерю точности и уменьшение срока службы, ограничивают возможности увеличения быстродействия устройства. Попытки уменьшить эти недостатки приводят к усложнению и утяжелению электромеханической части установок, увеличению количества измерительных устройств и усложнению аппаратуры управления.

Анализ основных факторов, влияющих на характеристики высокоточных электроприводов, приводит к идее максимального упрощения кинематических передач или их исключения, если это допускается компоновочной схемой проектируемой установки. Сравнение регулировочных свойств основных типов электродвигателей на основе обобщенной идеализирован-

ной модели электромеханического преобразователя энергии показывает, что предпочтительным для безредукторного привода является двухфазная синхронная машина с постоянными магнитами на роторе, используемая в режиме вентильного двигателя. Возможность уменьшения неравномерности электромагнитного момента за счет подбора формы фазных токов обеспечивает приближение свойств вентильного двигателя к идеальному источнику управляемого момента. Радикальное решение вопроса состоит в отказе от кинематических передач между исполнительным двигателем и рабочим механизмом вплоть до создания в ряде случаев интегрированного устройства, в состав которого входят также датчики механических и других переменных [1].

Серьезным препятствием для получения высоких значений динамической добротности следящей системы является также пониженная жесткость опорно-поворотного устройства, поскольку его приходится конструировать при существенных ограничениях на допустимую массу и качество материалов. Возникающие упругие механические колебания препятствуют расширению полосы пропускания следящей системы и, следовательно, повышению ее динамической добротности при сохранении устойчивости.

Для нейтрализации влияния собственных механических колебаний можно предложить два приема: подбор параметров привода, при которых обеспечивается существенное демпфирование колебаний за счет собственных свойств следящего электропривода или существенное повышение частоты собственных колебаний. В первом случае наиболее простой способ состоит в подборе такого соотношения момента инерции якоря двигателя и приведенного мо-

мента инерции нагрузки, при котором упругие колебания заметно демфируются за счет определенного вида механической характеристики исполнительного двигателя.

При втором подходе будем исходить из того, что при представлении модели электропривода в виде двухмассовой системы с невесомым упругим валом между ротором двигателя и нагрузкой существенными для работы следящей системы являются крутильные колебания между двумя свободными телами: ротором двигателя и нагрузкой. Частота этих колебаний с учетом коэффициента редукции определяется как

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_{12}(J_d k_p^2 + J_n^*)}{J_d J_n k_p^2}}, \quad (1)$$

где c_{12} — коэффициент жесткости механической передачи опорно-поворотного устройства; J_n^* — приведенный момент инерции нагрузки; J_d — момент инерции ротора двигателя; k_p — передаточное отношение редуктора.

Из выражения (1) следует, что при фиксированных значениях коэффициента жесткости и момента инерции нагрузки повысить частоту ω_0 можно, уменьшив приведенный момент инерции ротора двигателя. Максимальный эффект получается при использовании безредукторного привода, но это не всегда рационально, поскольку при существенных значениях момента инерции нагрузки и ускорений пришлось бы заметно увеличивать движущий момент и возможно проектировать заново двигатель. По этой причине, а также с учетом конструктивных особенностей опорно-поворотного устройства в ряде случаев целесообразно использовать редуктор с минимально возможным передаточным отношением.

Применение в следящих электроприводах опорно-поворотных устройств малого передаточного отношения редуктора при сохранении требуемых точностных и динамических показателей позволяет по сравнению с безредукторным вариантом уменьшить массу двигателя, т.е. таких дефицитных и дорогостоящих материалов как медь, магнитно-мягкие сплавы и высокотемпературная изоляция, снизить потери электроэнергии и уменьшить установленную мощность электрооборудования и первичных источников питания. Наличие редуктора обеспечивает и определенные конструктивные преимущества: нет необходимости предусматривать в двигателе центральное отверстие в вале для пропуска волноводов, световодов, кабелей и т.п.

Относительно низкие значения скорости и ускорения на валу двигателя, используемого в безредукторном или малоредукторном электроприводе, при высокой точности слежения требуют использования специализированных электродвигателей, особенно при большом сроке службы установки. Приемлемыми характеристиками для многих областей примене-

ния обладают бесконтактные моментные двигатели серии ДБМ, работающие в режиме вентильного двигателя, т.е. обеспечивающие характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением от постоянных магнитов [2].

Конструкция двигателей серии ДБМ для выполнения требований к безредукторному приводу или приводу с малым передаточным отношением редуктора и удовлетворения разнообразия применений выбрана в виде отдельных встраиваемых элементов — статора и ротора. Это обеспечивает конструктору определенную свободу выбора компоновочной схемы устройства, применения тех или иных компонентов механической части, выбора систем защиты и охлаждения. Встраиваемость обеспечивает компактность конструкции при соединении двигателя с рабочим механизмом (объектом управления) через простой механический преобразователь, возможность наращивания момента и мощности за счет соосной установки двигателей.

Двигатели серии ДБМ в соответствии с технической документацией на них могут применяться во всех режимах — от S1 до S8 по ГОСТ 183-74 — без ограничения по частоте пусков и реверсов, при любой форме и частоте фазных напряжений (амплитуда оговаривается в документации для каждого двигателя), любой схеме соединений секций фаз и любом виде нагрузки при условии, что амплитуда тока в обмотке статора не превышает установленного значения (обычно десятикратного по отношению к току, соответствующему номинальному моменту двигателя), а конструкция теплоотвода обеспечивает температуру обмотки не более 150°C для двигателей с пазовым статором и не более 120°C для двигателей с гладким (безпазовым) статором в течение минимальной наработки 20000 ч.

Измерение углового положения осей опорно-поворотного устройства относительно системы координат объекта базирования с высокой точностью (до нескольких угловых секунд) в широком диапазоне невозможно без цифрового представления результатов. Другими словами, информация от датчиков положения в систему наведения должна поступать в виде цифрового кода (обычно двоичного). Это же утверждение относится и к заданию входного воздействия в программном режиме или аналогичном ему. Естественно, что обработку таких сигналов с целью реализации алгоритмов регуляторов следящей системы и т.п. целесообразно осуществлять при помощи цифровых устройств. Техничко-экономические характеристики современных ЭВМ таковы, что они могут обеспечить достаточную производительность для получения требуемых точностных показателей при относительно низких затратах. Кроме того, для них разработаны и выпускаются модули сопряжения с объектами, не говоря уже о большой номенклатуре устройств отображения информации (дисплеи, прин-

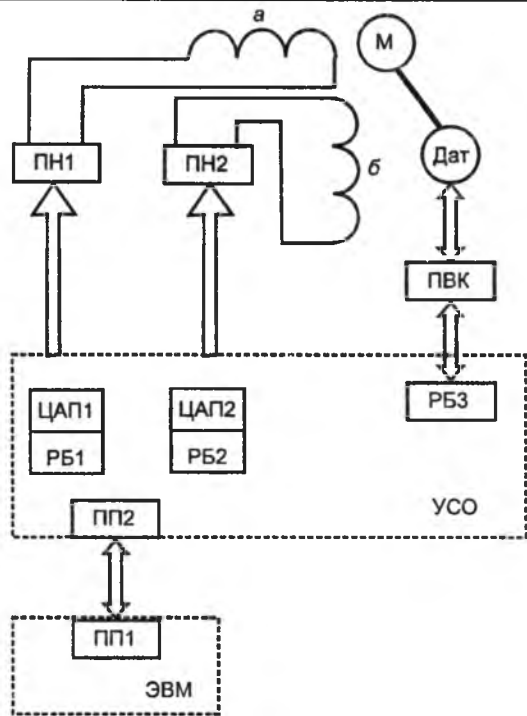


Рис.1. Структура цифрового следящего электропривода с вентильным двигателем

теры, графопостроители и т. п.). Это, а также большой выбор программных продуктов, позволяет легко реализовать при наладке и во время эксплуатации режим цифрового осциллографа, что существенно облегчает контроль точностных характеристик и качества процессов в следящем электроприводе на этапах экспериментальных исследований опытных образцов.

При наличии управляющей ЭВМ целесообразно строить схему управления следящего электропривода с вентильным двигателем в соответствии со структурой, приведенной на рис.1. Двухфазный моментный двигатель *М* механически связан через редуктор с объектом (на рис.1 не показаны) и датчиком углового положения *Дат*. Обмотки двигателя подключены к преобразователям напряжения *ПН1* и *ПН2*, а датчик соединен с преобразователем вал-код *ПВК*, который формирует питающие напряжения для датчика и преобразует его выходные сигналы в цифровой двоичный код. Эти модули подключены к устройству связи с объектом *УСО*, в котором для упрощения описания работы системы выделены только буферные регистры *РБ1—РБ3*, цифроаналоговые преобразователи *ЦАП1*, *ЦАП2* и приемо-передатчик *ПП2*. Он служит для организации связи с *ЭВМ* через ее собственный приемо-передатчик *ПП1*. В этой схеме на *ЭВМ* возложено большое число функций по реализации алгоритмов управления: вычисление ошибки, ее производной, определение текущего значения управления (напряжения якоря двигателя) и формирование фазных напряжений. Для последней операции используется часть промежуточных разря-

дов двоичного кода датчика углового положения. Рассматриваемая структура позволяет также производить запись текущих значений переменных состояния в запоминающее устройство (режим цифрового осциллографа). Эта возможность весьма полезна при настройке и наладке следящего электропривода. При достаточном быстродействии ЭВМ и пропускной способности линий связи от одной ЭВМ можно управлять приводами обеих координат системы наведения.

Для сравнения безредукторного и малоредукторного вариантов проведем синтез следящего электропривода, который должен обеспечивать точность не хуже 30'' при рабочей скорости не более 6 °/с и ускорении 1,5 °/с² при моменте инерции нагрузки 1250 кг·м² в программном режиме. Кроме того, предусматривается режим переброса с максимальной скоростью не более 10 °/с и ускорением не более 3 °/с². Датчик углового положения исполнительной оси имеет паспортную точность и разрешающую способность, соответствующую 18-ти двоичным разрядам (5'' или 2,424·10⁻⁵ рад). Предварительная проверка показала, что редукторный вариант, обеспечивающий максимальное демпфирование упругих колебаний за счет "оптимального" соотношения приведенных моментов инерции двигателя и нагрузки, не позволяет получить динамическую погрешность менее нескольких угловых минут без введения дополнительных обратных связей по переменным состояния следящей системы.

Требуемый динамический момент на исполнительной оси при максимальном ускорении определим как

$$M_{дин}^* = J_n^* \epsilon_{max} = 1250 \cdot 3 \cdot \pi / 180 = 65,45 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Примем момент трения на исполнительной оси $M_T^* = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Суммарный момент нагрузки (при отсутствии момента небаланса) $M_n^* \cong 68 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Для безредукторного варианта выберем два соосно установленных двигателя ДБМ185-16-0,3-2, каж-

Основные технические характеристики двигателей ДБМ

Параметр	ДБМ185-16-0,3-2	ДБМ185-6-0,2-2
Пусковой момент, Н·м, не менее	49,0	11,2
Число пар полюсов	8	8
Спротивление фазы постоянному току при температуре 20°С	0,4	2,53
Электромагнитная постоянная времени фазы, мс, не более	3,0	2,0
Приведенные к фазе коэффициенты: момента c_M , Н·м/А; ЭДС c_E , В·с/рад	0,835	1,23
Момент инерции ротора, кг·м ²	15·10 ⁻³	9·10 ⁻³
Момент сопротивления при обесточенных обмотках, Н·м, не более	0,8	0,3
Масса, кг, не более	9,25	5,4

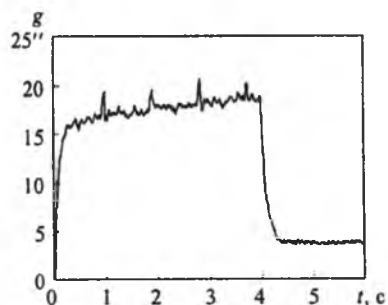


Рис.2. Осциллограмма ошибки следящего электропривода с малым передаточным числом редуктора

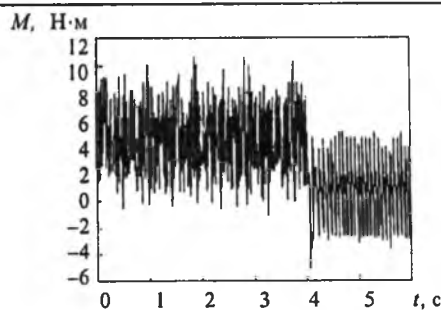


Рис.3. Осциллограмма момента электродвигателя

дый из которых характеризуется основными усредненными параметрами, приведенными в таблице.

С учетом соединительных деталей примем, что суммарный момент инерции роторов двигателей $J_d = 40 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, а упругость вала характеризуется коэффициентом жесткости $c_{12} = 70000 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{рад}$. Тогда частота собственных упругих колебаний двухмассовой системы

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{70000(40 \cdot 10^{-3} + 1250)}{1250 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}} = 1323 \text{ 1/с.}$$

Для следящей системы с астатизмом второго порядка требуемая динамическая добротность (с двукратным запасом):

$$K_2 = 2\epsilon_p/g_m = 2 \cdot 0,02618/1,4544 \cdot 10^{-4} = 360 \text{ 1/с,}$$

что соответствует базовой частоте

$$\omega_6 = \sqrt{K_2} = 18,97 \text{ 1/с.}$$

Таким образом, частота упругих колебаний безредукторного электропривода существенно выше базовой частоты следящей системы и практически не оказывает влияния на характер ее движения в переходных и установившихся режимах [3].

При переходе к малоредукторному варианту для удобства согласования цифрового датчика углового положения следящей системы и “бесконтактного коллектора” вентильного двигателя выберем коэффициент редукции $k_p = 8$. Суммарный максимальный момент нагрузки, приведенный к валу двигателя

$$M_n = M_n^*/k_p = 68/8 = 8,5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

В качестве исполнительного двигателя выберем ДБМ185-6-0,2-2 (см. таблицу).

Из-за наличия одной ступени редукции (“коренного зацепления”) и механического люфтовывибирания при помощи подпружиненной разрезной шестерни коэффициент жесткости уменьшился до $c_{12} = 35000$. Момент инерции ротора двигателя с присоединенными деталями $J_d = 12 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Частота упругих колебаний малоредукторного привода

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{35000(12 \cdot 10^{-3} \cdot 64 + 1250)}{12 \cdot 10^{-3} \cdot 64 \cdot 1250}} = 213,5 \text{ 1/с}$$

также заметно выше базовой частоты следящей системы.

Проведенное математическое моделирование следящей системы с астатизмом второго порядка и реализацией алгоритма регулятора на управляющей ЭВМ показало, что ее точностные характеристики практически не отличаются от требуемых. При моделировании было установлено, что хорошее приближение к характеристикам движения непрерывной системы получается при периоде дискретизации 0,002 с. При этом предполагалось, что алгоритм регулятора положения реализуется цифровым вычислителем за то же самое время 0,002 с, которое рассматривается как время запаздывания. Предполагалось также, что обмотки статора двигателя питаются от источников управляемого напряжения, максимальное значение которого не превышает $u_n = 27 \text{ В}$.

Задающее воздействие сформировано так, чтобы на первом этапе система разгонялась с ускорением $1,5 \text{ }^\circ/\text{с}^2$ до скорости $6 \text{ }^\circ/\text{с}$, а затем двигалась с этой скоростью. Это достигается за счет того, что за время от 0 до $t_0 = 4 \text{ с}$ задающее воздействие изменяется как $\theta_3 = \epsilon t^2/2$, а затем как $\theta_3 = \epsilon t_0(t - t_0/2)$.

Результаты моделирования для показателя колебательности $M = 1,25$, $K_2 = 360 \text{ 1/с}^2$ представлены осциллограммами на рис.2 и 3. Ошибка системы g представлена на рис.2, а на рис.3 — момент двигателя. Хорошо видно, что динамическая ошибка не превышает $20''$, а кинематическая — $5''$. Хотя движение исполнительной оси “гладкое”, движущий момент претерпевает заметные колебания. Это естественный результат построения механической части двухмассовой системы, у которой приведенный момент инерции нагрузки существенно больше момента инерции ротора двигателя. Колебания момента двигателя нужно учитывать при проектировании опорно-поворотного устройства, особенно узлов сочленения движущихся частей.

Сравнение безредукторного и малоредукторного вариантов, выполненных на основе серийных моментных двигателей, показывает, что масса активных материалов для двигателей безредукторного привода больше примерно в 3,4 раза, а установленная мощность силовых электрических преобразователей почти в 12 раз. Такая существенная разница обусловлена тем, что в серии ДБМ отсутствуют двигатели с большим диаметром статора и номинальным момен-

том и приходится устанавливать соосно два двигателя с завышенным суммарным пусковым моментом. Но даже при использовании специально спроектированного двигателя выигрыш может оказаться заметным. Следовательно, при создании систем с погрешностью наведения, оцениваемой десятками угловых секунд, перспективным следует считать использова-

ние малоредукторных следящих электроприводов с моментными вентильными двигателями.

Список литературы

1. Цаценкин В.К. Безредукторный автоматизированный электропривод с вентильными двигателями. М.: МЭИ, 1991.
2. Бесконтактный моментный привод. Л.: ЛДНТП, 1990.
3. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1970.

Электродвигатели с переменным магнитным сопротивлением для современного регулируемого электропривода

САДОВСКИЙ Л. А., ВИНОГРАДОВ В. Л.

Рассмотрены новые типы электродвигателей, главным образом, индукторных (ИД), имеющих разное число фаз и форму магнитопровода. ИД предназначены для современного вентильно-индукторного электропривода с микропроцессорным управлением. Приведены расчетные соотношения и алгоритмы управления ИД и их сравнительная характеристика с распространенными двигателями.

Революционный скачок, достигнутый к концу XX века в области силовой и слаботочной электроники, привел к кардинальным изменениям в области электромеханики. Создано новое направление — мехатроника, аккумулирующая достижения в области электроники, вычислительной техники и электропривода. Требования к электрической машине, предназначенной для регулируемого электропривода (РЭП), робототехнических комплексов в машиностроении, лазерной и электронной технологиях и т. д., существенно изменились.

Главное внимание электромехаников в 80-90 годы уделялось созданию безколлекторных электроприводов с машинами переменного тока, которые питаются от транзисторных ШИМ-инверторов с микропроцессорным управлением. Наряду с асинхронными двигателями (АД), к ним относятся синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СВД) или безобмоточным ферромагнитным ротором (СРД) и распределенной трехфазной обмоткой, аналогичной АД. Значительное число публикаций в зарубежной и отечественной технической литературе посвящено разработке и исследованию вентильных приводов (ВИП) с индукторными двигателями (ИД), нетрадиционным для общепромышленного применения.

Индукторные машины разных конструкций нашли широкое применение в шаговом РЭП малой мощности ($P \leq 1$ кВт) и высокочастотных общепромышленных и авиационных генераторах большой мощности ($P = 10 \div 1500$ кВт, $f = 0,4 \div 30$ кГц, $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин).

Теория шагового ЭП и промышленные серии

ИД от часовых до силовых разработаны в МЭИ в 60—80 годы [1,2].

Статья отражает многолетний опыт работы авторов в группе дискретного электропривода кафедры АЭП под научным руководством проф. М.Г.Чиликина и Б. А.Ивоботенко.

Лет 10—15 назад даже специалистам в области шагового ЭП и индукторных генераторов, хорошо знающим преимущества этих машин в специфических областях применения, могла показаться сомнительной мысль, что ИД может быть универсальной машиной для различных областей техники, а ВИП, выполненный на современной элементной базе, окажется конкурентоспособным с известными электроприводами.

Скептицизм в отношении использования индукторных машин для широкорегулируемого, динамичного ЭП большой мощности основывался на таких недостатках шаговых двигателей (ШД), как низкий КПД, прерывистость и колебательность движения при низких скоростях, малые воздушные зазоры, плохое использование магнитопровода мощных индукторных генераторов при гребенчатых зонах полюсов, необходимых для получения высоких частот при частоте вращения 3000 об/мин.

Вентильный режим работы ШД полностью снял проблемы колебательности и снижения КПД и использовался во многих ответственных приводах спецназначения. Применение вентильного режима в силовых шаговых ЭП станков с ЧПУ и других механизмах не получило поддержки в промышленности как из-за отсутствия дешевых надежных датчиков по-

ложения и высокочастотных мощных транзисторов, так и из-за нежелания отказаться от простой разомкнутой структуры привода.

Заслуга в области создания ВИП большой мощности принадлежит проф. П. Лоуренсону — известному специалисту по теории и расчету полей электрических машин и шаговому ЭП [3,4]. Под его руководством был успешно выполнен конкурсный проект по разработке тяговых ВИП с весьма жесткими требованиями в отношении КПД, прочности, надежности и т. п., а после этого организована промышленная фирма, выпустившая первую в мире серию общепромышленных ИД ($P_n = 4\div 35$ кВт). Интересно отметить, что Великобритании принадлежит приоритет в области тягового ИД, который был установлен на первом трамвае в 1842 г.

Рассмотрим особенности конструкций и управления двигателей, которые применяются в современном вентильном электроприводе.

Индукторные и синхронные реактивные двигатели работают за счет изменения магнитного сопротивления ротора. От степени магнитной несимметрии, разной у этих машин, зависят значение выходного момента и другие показатели. В [1,5] показано, что несмотря на сходный принцип действия СРД и ИД относятся к разным классам электрических машин и применяются в разных структурах ЭП.

Принципиальными отличиями ИД от других типов электрических машин и, в частности, от СРД, имеющих гладкий статор с распределенной обмоткой, являются:

— двухсторонняя зубчатость магнитопровода, позволяющая повысить магнитную несимметрию машины и удельный электромагнитный момент простыми средствами;

— разное (а не одинаковое, как в АД, СВД, СРД) число полюсов статора и ротора, что приводит к кратным (т.е. не синхронным) и часто противополож-

ным по направлению частотам вращения результирующего вектора потока статора Φ_Σ и безобмоточного зубчатого ротора;

— пульсирующие однополярные потоки в воздушном зазоре ИД $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \dots \Phi_m$, от m -фазных, дискретно смещенных в расточке катушечных обмоток, питающихся однополярными токами произвольной формы;

— реальный (от магнитов или катушечной обмотки в ИД с внешним возбуждением) Φ_0 или эквивалентный поток Φ_0 от постоянной составляющей i_0 однополярных фазных токов (ИД с самовозбуждением).

В промышленных ВИП наиболее распространены трех- и четырехфазные ИД с самовозбуждением. На рис. 1 показаны состав и структура ВИП на базе четырехфазного индукторного двигателя. Современный вентильный привод включает в себя следующие элементы: m -фазный ИД, инвертор, построенный на современных интеллектуальных транзисторных модулях, датчик положения ротора и аппаратную или программную систему управления. Инвертор получает сигналы от датчика положения, который переводит двигатель в режим самокоммутации, т.е. режим вентильного управления. Именно за счет реализации такой структуры удалось кардинальным образом улучшить энергетические, динамические и регулировочные характеристики, а также повысить надежность ВИП.

На рис. 1 показан поперечный разрез конструкции ИД, имеющего 8 полюсов статора и 6 ротора. По соотношению полюсов принято различать двигатели; на рис. 1 представлен тип 8/6. Статор и ротор двигателя набраны из листов стали с прямыми зубцами — полюсами. Катушки противоположных полюсов AA', BB', CC', DD' соединяются последовательно и согласно (для вентильного режима работы). При этом рабочий поток возбужденной фазы (например A) проходит через воздушный зазор рабочих полюсов и ярмо статора, а магнитная связь между соседними фазами незначительна. Фазные обмотки A, B, C, D питаются однополярными импульсами тока от инвертора, который в вентильном режиме управляется сигналами от датчика положения ДП, а в шаговом — от внешнего источника. При возбуждении фазы зубчатый ротор занимает соосное с ней положение, поворачиваясь в зону минимального магнитного сопротивления, т. е. максимальной индуктивности.

Четырехфазные ИД с большим числом зубцов на роторе и дополнительными зубцами на полюсных выступах статора весьма распространены в отече-

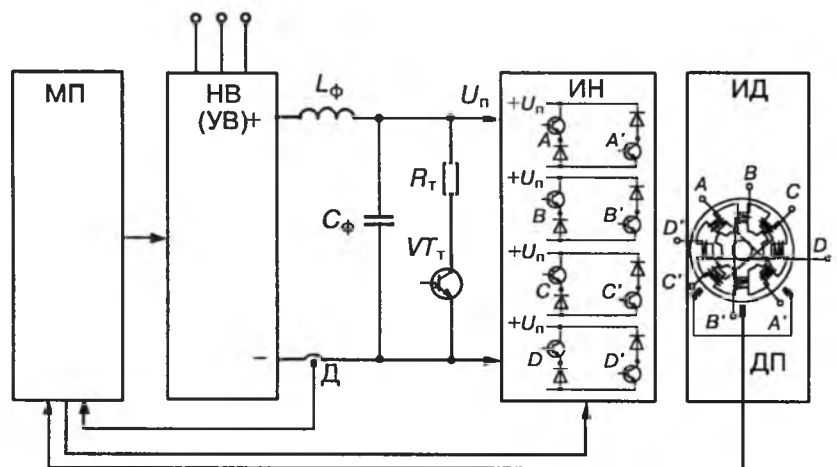


Рис.1. Состав и структура ВИП

ственным и зарубежном шаговом и вентильном ЭП [1,4]. Они имеют различные способы соединения фазных катушек и алгоритмы их коммутации.

Ключи инвертора на рис. 1 выполнены по схеме несимметричного моста, наиболее распространенного в современном ВИП. Фазные обмотки $AA' \dots DD'$ включаются в диагонали мостов, что обеспечивает независимость протекания электромагнитных переходных процессов в фазах и любые алгоритмы управления. Существует много различных схем m -фазных инверторов с меньшим количеством ключей (от m до $2m$) [2,4].

В ИД с двумя полюсами на фазу, как на рис.1, число зубцов ротора не может быть произвольным и связано с числом фаз m

$$Z_p = 2(km \pm 1), \quad (1)$$

где $k = 0, 1, 2, 3 \dots$ — любое целое число.

Зубец и паз ротора индукторной машины соответствуют полюсному делению. Это означает, что число пар полюсов p равно Z_p , а связь между электрическими θ и механическими θ_m углами выражается как

$$\theta = Z_p \theta_m. \quad (2)$$

Выбором Z_p в соответствии с (1) и достигается автоматический сдвиг фазных зон статора и ротора на угол $2\pi/mZ_p$, как на рис.1.

Каждая коммутация фаз ИД вызывает поворот вектора потока статора на электрический угол

$$\theta = 2\theta/m; \quad \theta = 360^\circ/m, \quad (3)$$

соответственно ротор поворачивается при этом на меньший в Z_p (электрическая редукция), т.е. механический угол

$$\theta_m = \theta/Z_p = 2\pi/mZ_p; \quad \theta_m = 360^\circ/mZ_p. \quad (4)$$

Частота вращения ИД (c^{-1}), как и любой электрической машины, снижается при увеличении числа пар полюсов (зубцов ротора) при той же выходной частоте инвертора f_n

$$\omega = \frac{2\pi}{p} f_n = \frac{\pi(Z_c - Z_p)}{Z_p} f_n. \quad (5)$$

Произведение mZ_p является весьма важным показателем ВИП, так как от правильного выбора числа фаз и зубцовой структуры зависят многие характеристики привода.

Синхронизирующий момент M_c m -фазного ИД с заторможенным ротором рассчитывается по производной потокосцепления $\psi_j(\theta, I)$ фазы, а при аппроксимации собственной индуктивности $L_{jj}(\theta)$ двумя членами гармонического ряда имеет вид:

$$M_c(\theta) = M_{cmax} \sin(\theta_0 \pm 2\pi/m), \quad (6)$$

где амплитуда статического синхронизирующего момента

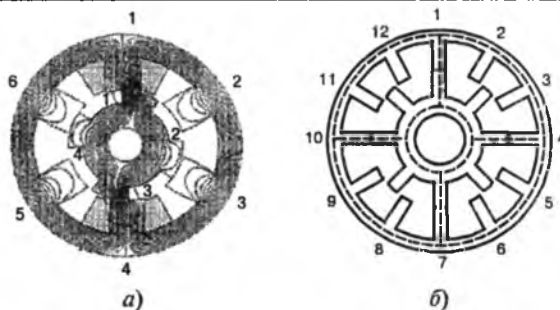


Рис.2. Поперечные разрезы трехфазных ИД:

а — тип 6/4 с двумя полюсами на фазу; б — тип 12/8 с четырьмя полюсами на фазу

$$M_{cmax} = \frac{1}{2} I_n^2 Z_p L_1 \xi_1 = \frac{1}{4} Z_p \left(1 - \frac{1}{K_R}\right) L_{max} \xi_1 I_n^2 = C_m \left(1 - \frac{1}{K_R}\right); \quad (7)$$

I_n — ток j фазы; L_1, L_{max} — амплитуда первой гармоники и максимальное значение индуктивности; $\xi_1 = 0,6 \div 0,8$ — усредненный коэффициент насыщения; $K_R = L_{max} / L_{min} = L_d / L_q$ — кратность реактансов, характеризующая магнитную несимметрию ИД и СРД.

Как следует из (7), увеличение Z_p и K_R приводит к росту амплитуды M_{cmax} и среднего момента ИД. За счет двойной зубчатости средние значения $K_R = 5 \div 10$, а при малом насыщении стали доходят до 20—25. В СРД с односторонней зубчатостью магнитопровода K_R существенно меньше.

Участок положительной полуволны (б) соответствует двигательному режиму работы ИД, когда его ротор поворачивается в сторону согласования магнитных осей ($\theta \leq \theta_d$). Дальнейший поворот ротора ($\theta \geq \theta_d$) приводит к изменению знака момента M_c , т.е. к генераторному режиму.

В вентильном режиме работы ИД при углах, близких к θ_d , происходит автоматическая коммутация очередной фазы по сигналу датчика положения.

На рис.2 показаны конструкции трехфазных ИД с самовозбуждением типа 6/4 и 12/8. На магнитопроводе шестиполюсного двигателя показаны магнитные силовые линии при согласном включении катушек 1 и 4. Поток фазы 1 не проходит через полюса 2, 3, 5, 6 с малым сопротивлением воздушного зазора, поэтому магнитная связь между фазами 1, 2, 3 незначительна при любых θ . Аналогичные картины полей, рассчитанные методом конечных элементов, имеет четырехфазный ИД на рис.1. Слабая магнитная связь между фазами существенно упрощает математическую модель ИД [4, 6, 7] и повышает надежность ВИП. Фазные катушки ИД 12/8 расположены на четырех взаимно перпендикулярных полюсах, что сокращает контуры потоков (пунктирные линии) и потери в стали, а также механические деформации статора и акустические шумы.

Сдвиг фазных зон на mZ_p при необходимости

Параметры ВИП с ИД типа 6/4 и 8/6 при разных алгоритмах управления

Параметры	Двигатель трехфазный			Двигатель четырехфазный		
	Коммутация			Коммутация		
	трех- тактная	симмет- ричная	шести- тактная	четыре- тактная	симмет- ричная	восьми- тактная
Последовательность переключения фаз	1,2,3,1	12,23, 31,12	1,12,2, 23,3,31,1	1,2,3,4,1	12,23,34, 41,12	1,12,2,23, 3,34,4,41,1
Величина механического шага	$\pi/6$		$\pi/12$	$\pi/12$		$\pi/24$
Амплитуда статического синхронизирующего момента	$M_{м3}$		$M_{м3}$	$M_{м4}$	$\sqrt{2} (1-2) M_{м4}$	
Число положений ротора на один оборот (тактов работы инвертора)	12		24	24	24	48
Частота инвертора при одинаковой синхронной частоте вращения двигателя ω_c	$0,64\omega_c$		$1,27\omega_c$	$0,95\omega_c$	$0,95\omega_c$	$1,9\omega_c$
Частота вращения ω_c при фиксированной частоте инвертора f_n	$1,57f_n$		$0,79f_n$	$1,05f_n$	$1,57f_n$	$0,52f_n$
Относительная пульсация момента ΔM	0,5		0,13	0,3	0,3	0,1
Число силовых ключей инвертора	3—6		3—6	4—8	4—8	4—8

увеличения Z_p и ограниченном диаметре расточки статора выполняется тремя способами: 1) за счет нарезки дополнительных мелких зубцов на полюсах статора с тем же полюсным делением, что и на роторе; 2) расположением большего количества катушек одной фазы на разных полюсах, как на рис.2,б; 3) аксиальным поворотом пакетов стали с фазными катушками (многостаторные конструкции). Первый и третий способы типичны для ШД [1,2]. Второй способ нашел применение в промышленных ВИП для средних и крупных машин.

Аналогичные контуры потока образуются в четырехфазном ИД при парной коммутации (табл.1) и в пятифазном ИД типа 10/8, дополнительное достоинство которого — близкий к окружности годограф моментов. Число фаз m является фактором, определяющим многие свойства ВИП.

— увеличение фаз всегда уменьшает пульсации момента и скорости, но может привести к росту числа ключей инвертора, если не использовать схемы с общими ключами для разных фаз и дополнительными диодами;

— изменением режима коммутации в процессе управления ВИП можно пользоваться для улучшения пусковых свойств двигателя и повышения среднего момента в области высоких скоростей;

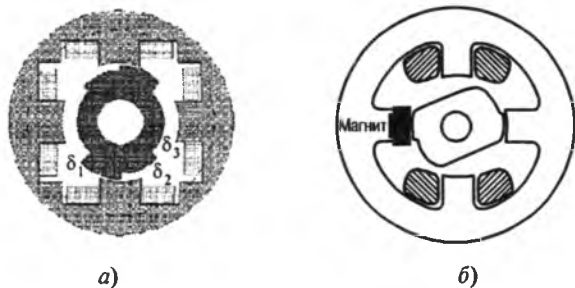


Рис.3. Поперечные разрезы ИД с разной формой ротора

— в традиционных активных и реактивных синхронных машинах невозможно увеличивать число пар полюсов $2p$, как Z_p в ИД, без существенного повышения их габаритов

— использование несимметричной шеститактной коммутации (табл. 1) эквивалентно удвоению числа фаз трехфазного ИД, чем широко пользуются в разомкнутом шаговом электроприводе.

В табл.1 приведены сводные данные о ВИП с трех- и четырехфазными двигателями при разных алгоритмах коммутации. При ее составлении использовались выражения (5)—(7). В [5] приведены векторные диаграммы и совмещенные кривые $M_{ij}(\theta)$ для циклов разных коммутации фаз ИД 6/4 и 8/6.

Кусочно-линейная аппроксимация $L_{ij}(\theta)$ и кривых намагничивания широко применяется разными авторами для объяснения принципа работы ВИП, процессов преобразования энергии в ИД, настройки углов коммутации и т.д. [4, 6, 7]

Рассмотренные конструкции относятся к *реверсивным* ИД с симметричной магнитной системой и числом фаз $m \geq 3$.

Остановимся на особенностях *нереверсивных* ИД. Главная проблема при разработке *нереверсивных* ВИП — создание пускового момента и ограничение колебаний скорости при резко пульсирующем моменте. В однофазных ИД (рис.3,б) для этого используются специальные пусковые магниты, демпферные контуры, специальные зубчатые зоны, расширяющие двигательный участок характеристики $M(\theta)$ [1]. Двухфазные двигатели выполняются с несимметричным ротором, имеющим выступы (рис.3,а), клювообразную или спиралевидную форму. Такие двигатели нашли применение в бытовой технике и медицине [1,3,4].

Особо привлекательной представляется возможность создания РЭП с *однофазными* ИД для массо-

Таблица 2

Сравнение электроприводов с разными двигателями

Показатель	Тип двигателя				
	ДПТ	СВД	АД	ИД	СРД
Технологичность и стоимость изготовления двигателя	—	—	0	+	0
Количество ключей преобразователя и элементов управления	+	—	—	0	—
Сложность математической модели и алгоритма управления	+	+	—	—	0
Высокие скорости вращения	—	0	+	+	+
Акустический шум	0	0	+	—	0
Нагрев ротора	—	+	—	+	+
Ослабление поля	—	—	+	+	+
Пульсации скорости и момента	+	+	+	—	0
Возможность косвенного измерения положения ротора	—	0	—	+	0
Надежность	—	0	0	+	0

вых областей применения, таких как бытовая техника и т.д.

Конструкции однофазного ИД, разработанного специально для ВИП, показана на рис.3,б. Двигатель имеет магнитопровод, аналогичный двухфазному ИД на рис.3,а, с той только разницей, что вместо обмотки на вспомогательных полюсах укреплен фиксирующий магнит. В обесточенном состоянии несимметричный ротор ориентирован по потоку магнита, как показано на рис.3,б. В контуре этого потока укреплен датчик ЭДС Холла (не показан на рис.3,б), который используется для самокоммутации. Подача дозированного импульса тока на обмотку пусковых полюсов вызывает поворот ротора против часовой стрелки; после отключения тока тормозной момент основных полюсов исчезает, а движение ротора продолжается по инерции в сторону вспомогательных полюсов и т.д. По принципу действия такие однофазные ИД относятся к двигателям с инерционным выбегом ротора.

Хорошо спроектированный ИД может служить эталоном идеального электромеханического преобразователя с точки зрения энергопотребления, габаритов и надежности. По этой причине МЭИ совместно с НИИчаспром были разработаны и серийно выпускаются ШД торцевого типа для разных приборов времени. Наиболее перспективны для однофазных ВИП двигатели с кратными зубцовыми делениями пусковых и рабочих полюсов. Каждая полюсная зубцовая зона в этих ИД создает свою синусоиду $M(\theta)$. Результирующая кривая $M_{\Sigma}(\theta)$ является суммой гармоник, амплитуды и фазовые сдвиги которых зависят от кратности и взаимного расположения зубцов на от-

дельных полюсах. Форма $M_{\Sigma}(\theta)$ обеспечивает устойчивое однонаправленное движение, которое рассчитывается по минимальному энергопотреблению [1].

Помимо рассмотренных ИД с самовозбуждением существуют различные индукторные машины с электромагнитным возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов [5, 8]. Они управляются от серийных разнополярных трехфазных инверторов для АД. ВИП с этими более сложными и дорогими ИД имеют весьма высокие технико-экономические характеристики, особенно для скоростных РЭП.

В заключение приведем сравнительную характеристику электроприводов с разными типами двигателей. Табл. 2 составлена из опыта МЭИ и сведений из периодической литературы последних лет. С помощью знаков « + », « — » и « 0 » дается условная оценка параметров и свойств двигателей.

Управляемый выпрямитель для ДПТ имеет 4 транзисторных ключа; ШИМ-инверторы для СВД, АД и СРД — 6 ключей, а для ИД — от m до $2m$ ключей в зависимости от числа фаз и способа возбуждения двигателя. Здесь для сравнения использованы высокомоментные ДПТ с магнитами на статоре. Питание инверторов осуществляется от звена постоянного тока с нерегулируемым напряжением.

Из табл.2 следует, что при всей условности оценок новые типы двигателей СРД и ИД имеют более высокий рейтинг, чем традиционные СВД и АД, давно освоенные промышленностью. На кафедре АЭП проводятся интенсивные исследования в области теории и практической реализации ВИП с разными типами ИД. Созданы универсальный m -фазный преобразователь ($S \leq 15$ кВ·А, $U_{\max} = 420$ В) с микропроцессорным управлением, опытные образцы трех- и четырехфазных ИД с различной конфигурацией зубцовой зоны ($P \leq 0,2+8$ кВт), разработаны различные математические модели и методы расчета ВИП [2, 5—7, 9]. Полученные результаты позволяют отнести ВИП к весьма перспективному электроприводу XXI века для различных областей техники.

Список литературы

1. Ивоботенко Б.А., Рубцов В.П., Садовский Л.А., Цаценкин В.К. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями М., 1971.
2. Ивоботенко Б.А., Козаченко В.Ф. Проектирование шагового электропривода. М.: МЭИ, 1985.
3. Lawrenson P. A brief status review of Switched Reluctance Drives//EPE Journal. 1992. Vol. 2, No. 3. P. 133—134.
4. Miller T. SRM and their control. Oxford University Press, 1993.

5. Садовский Л.А., Виноградов В.Л., Черенков А.В. Новые типы двигателей для регулируемого электропривода. М.: Информэлектро, 1999.

6. Бычков М.Г. Элементы теории ВИП//Электричество. 1997. №8.

7. Ильинский Н.Ф. Перспективы применения ВИП в со-

временных технологиях//Электротехника. 1997. №2. С. 2—3.

8. Lipo T. Advanced motor technologic: Converter Fed Machines//IEEE Trans. 1997. P. 204—222.

9. Кузнецов В.А., Садовский Л.А. Виноградов В.Л. Лопатин В.В. Особенности расчета ИД для вентильного ЭП// Электротехника. 1988. №6.

Опыт работы испытательной лаборатории электротехнических изделий МЭИ

СЕРГИЕВСКИЙ Ю.Н., ПЛАТОНОВА В.Е.

Описана деятельность кафедры автоматизированного электропривода в области испытаний электроприводов и их элементов, проводимая в испытательной лаборатории электротехнических изделий МЭИ. Отражены возможности аккредитованной лаборатории, опыт сертификационных и исследовательских испытаний и наблюдения за развитием рынка регулируемых электроприводов.

Развивающийся отечественный рынок электротехнической продукции и его потребности в объективной всесторонней оценке качества изделий и их сертификации на фоне ощутимой активности служб государственного, ведомственного надзора и таможенных органов определили создание в 1994 г. кафедрой автоматизированного привода на своей базе испытательной лаборатории электротехнических изделий (ИЛ ЭИ МЭИ).

Вескими аргументами в пользу создания лаборатории в стенах технического университета является наличие квалифицированных кадров с большим опытом исследовательской работы, наличие современного производственного испытательного и измерительного оборудования, а также налоговые льготы, установленные для высшей школы.

Дополнительными благоприятными моментами для фирм-производителей и поставщиков продукции является широкая аудитория технической периодики, где постоянно освещаются результаты успешных испытаний изделий, а также большой контингент студентов — будущей технической элиты, знакомящийся с передовой продукцией фирм.

Для потребителя электротехнической продукции привлекательна безусловная независимость

лаборатории от производителя, кровно заинтересованного в положительных результатах испытаний.

В 1995 г. ИЛ ЭИ МЭИ аккредитована Госстандартом РФ на независимость и техническую компетентность (Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21 МО23, подтвержденный с расширением области аккредитации 28 мая 1999 г.).

В область аккредитации ИЛ ЭИ МЭИ входят:

- электрические двигатели мощностью до 40 кВт;
 - полупроводниковые преобразователи и блоки питания до 50 кВт;
 - комплектные электроприводы до 40 кВт;
 - низковольтные комплектные устройства;
 - трансформаторы до 5 кВ·А;
 - батареи, элементы первичные и аккумуляторы малой мощности;
 - аккумуляторы и аккумуляторные батареи для автомобилей и мотоциклов.
- Для всей указанной продукции проводятся следующие группы испытаний:
- определение функциональных показателей и испытания на надежность;
 - испытания на безопасность;
 - испытания степени защиты;
 - определение уровня шума и вибрации;
 - испытания на стойкость к внешним кли-

матическим и механическим воздействиям.

Для испытаний в области аккредитации лаборатория имеет все необходимое оборудование, в том числе термовлагокамеру ($-40...+100^{\circ}\text{C}$), вибрационный и ударный стенды, электрические и механические нагрузочные устройства, источники питания, а также аттестованные Ростестом средства измерения и компьютеризированный измерительный комплекс.

Что же показали первые годы работы лаборатории?

Как и предполагалось на этапе создания лаборатории, круг заинтересованных в ее услугах организаций оказался весьма широк. Он включает следующие категории.

— Некоммерческие организации, созданные для охраны прав и защиты интересов потребителей — телевизионная программа НТВ «Впрок», Московское общество защиты потребителей, а также техническая пресса, проводящая рейтинги продукции для правильной ориентации покупателя на рынке — редакции журналов «Приводная техника» и «Мир ПК» издательского дома «Открытые системы». Эти организации заинтересованы в соблюдении строгого соответствия продукции стандартам безопасности, а также в тщательном всестороннем анализе потребительских качеств продукции и доведении его результатов до покупателя.

— Разработчики и изготовители электротехнической и электронной продукции — фирмы, производящие электрические машины, преобразовательную технику, комплектные электроприводы и устройства управления ими, как правило, заинтересованные в глубоком анализе параметров, характеристик и функциональных показателей продукции с целью ее совершенствования и прочного долговременного обустройства на рынке.

— Торговые фирмы — поставщики продукции, заинтересованные в минимально необходимых испытаниях на безопасность и получении соответствующего сертификата, гарантирующего законное нахождение данной продукции на

рынке в течение определенного срока, как правило, трех лет. Это пока наиболее многочисленная категория наших клиентов.

За пять лет работы в ИЛ ЭИ МЭИ испытана самая различная продукция: двигатели постоянного тока, асинхронные, коллекторные, вентильные индукторные малых и средних габаритов, низковольтные комплектные устройства, преобразователи частоты и управляемые выпрямители, стабилизаторы и источники бесперебойного питания, элементы питания и аккумуляторы различного назначения. Подавляющая часть продукции успешно прошла испытания, а сертифицируемая получила сертификат соответствия.

Отрадным фактом является также и то, что фирмы начали проявлять интерес не только к минимальным по объему испытаниям на безопасность, дающим возможность получить сертификат, но и к детальным функциональным испытаниям, дающим полную и глубокую картину потребительских показателей продукции и ее совместимости с окружающими объектами и средой.

Хотелось бы надеяться, что в скором времени отечественный рынок современных электроприводов достигнет той фазы развития, когда производитель и поставщик продукции станут заинтересованы в полном и объективном раскрытии качеств своей продукции, а квалифицированный покупатель получит все возможности для уверенной ориентации на этом рынке. Во имя этих целей кафедра совершенствует подготовку инженерных и научных кадров, а ее лаборатория расширяет испытания электротехнической продукции.

Реквизиты ИЛ ЭИ МЭИ: 111250, Москва,

Красноказарменная, 13, кафедра АЭП.

Тел.: 3627652; Факс: 2731348

E-mail: Serg@aep.mpei.ac.ru

INTERNET: <http://aep.mpei.ac.ru>.

Сведения об авторах опубликованных статей



КЛЮЧЕВ
Владимир Иванович -
заслуженный деятель
науки и техники РФ,
доктор техн. наук,
выпускник МЭИ 1952 г.



ТЕРЕХОВ
Владимир Михайлович -
доктор техн. наук,
выпускник МЭИ 1953 г.

ИЛЬИНСКИЙ
Николай Федотович -
заслуженный деятель
науки и техники РФ,
лауреат Государственной
премии, доктор техн.
наук, профессор,
выпускник МЭИ 1955 г.



ЦАЦЕНКИН
Виктор Кириллович -
канд. техн. наук, старший
научный сотрудник,
выпускник МЭИ 1956 г.



САДОВСКИЙ
Лев Александрович -
канд. техн. наук,
доцент, выпускник
МЭИ 1956 г.



КУДРЯВЦЕВ
Анатолий Викторович -
канд. техн. наук,
ведущий научный
сотрудник, выпускник
МЭИ 1960 г.

ЛУЦЕНКО
Виктор Евгеньевич -
канд. техн. наук,
старший научный
сотрудник, выпускник
МЭИ 1960 г.



МАСАНДИЛОВ
Лев Борисович -
доктор техн. наук,
профессор, выпускник
МЭИ 1961 г.



КОЗЫРЕВ
Сергей Картерьевич -
канд. техн. наук, профес-
сор, заведующий кафедрой,
выпускник МЭИ 1962 г.



МОСКАЛЕНКО
Владимир Валентинович -
канд. техн. наук,
профессор,
выпускник МЭИ 1963 г.



АЛФЕРОВ
Вячеслав Георгиевич
 - канд.техн.наук,
 доцент, выпускник
 МЭИ 1964 г.



ОСИПОВ
Олег Иванович -
 доктор техн.наук,
 профессор,
 выпускник ЧПИ 1964 г.



ГОРНОВ
Александр Олегович -
 канд.техн.наук,
 доцент, выпускник
 МЭИ 1967 г.

МИРОНОВ
Леонтий Михайлович -
 канд.техн.наук,
 профессор, выпускник
 МЭИ 1970 г.



АНИСИМОВ
Валерий Алексеевич -
 канд.техн.наук,
 доцент, выпускник
 МЭИ 1971 г.



СЕРГИЕВСКИЙ
Юрий Николаевич -
 канд.техн.наук,
 доцент, выпускник
 МЭИ 1971 г.

ОБУХОВ
Николай Александрович -
 канд.техн.наук,
 старший научный
 сотрудник, выпускник
 МЭИ 1971 г.



ЛАДЫГИН
Анатолий Николаевич -
 канд.техн.наук,
 доцент, выпускник
 МЭИ 1972 г.



БОГАЧЕНКО
Дмитрий Дмитриевич
 - канд.техн.наук,
 доцент, выпускник
 МЭИ 1973 г.



БЫЧКОВ
Михаил Григорьевич -
 канд.техн.наук,
 доцент, выпускник
 МЭИ 1973 г.



СЛИВИНСКАЯ
Галина Андреевна -
канд.техн.наук,
старший научный
сотрудник, выпускник
МГУ 1973 г.



ОВСЯННИКОВ
Евгений Михайлович -
канд.техн.наук,
старший научный
сотрудник, выпускник
МЭИ 1974 г.

КОЗАЧЕНКО
Владимир Филиппович -
канд.техн.наук,
доцент, выпускник
МЭИ 1975 г.



БАЛКОВОЙ
Александр Петрович -
канд.техн.наук,
старший научный
сотрудник, выпускник
МЭИ 1977 г.



ПЛАТОНОВА
Вера Евгеньевна -
канд.техн.наук,
доцент, выпускник
МЭИ 1978 г.

ЕЛИСЕЕВ
Дмитрий Алексеевич -
выпускник МЭИ 1994 г.

ВИНОГРАДОВ
Виталий Леонидович -
выпускник
МЭИ 1996 г.



РЕЗНИКОВСКИЙ
Андрей Михайлович -
выпускник
МЭИ 1996 г.



ФОМИН
Сергей Анатольевич -
студент ПТ-96.



ВЕСЕЛОВ
Михаил Валерьевич -
аспирант, выпускник
МЭИ 1998 г.

Вниманию руководителей
предприятий, объединений, НИИ и КБ, вузов
Редакция журнала "Электротехника"
предлагает услуги
по подготовке и выпуску на договорных условиях специальных
(тематических) номеров журнала "Электротехника" по тематике и материалам
(в том числе и рекламным) заказчика.

Справки по телефону: 254-11-52

Внимание!

Но журнал "Электротехника" еще не поздно подписаться
в редакции или в любом почтовом отделении по объединенному каталогу
Департамента почтовой связи РФ (Зеленый) – Индекс 7111.
Подписавшись в редакции, Вы избежите высоких почтовых расходов.
Стоимость одного номера – 70 руб. (для Москвы)
75 руб. – для подписчиков РФ.
В редакции можно купить журналы за предыдущие годы
со значительной скидкой.

СОВЕНКОН 16-19.05/2000
Застависа проводит фирма "Совенкон"

С-Петербург
ЛЕНЭКСПО

Телефоны, факс:
296-0134,
296-0016
296-0845

На выставке будут представлены:

- Светильники промышленные и бытовые
- Светильники люминесцентные
- Пускорегулирующая аппаратура
- Специализированные осветительные устройства внутреннего и наружного применения (прожекторы, уличное освещение, медсветильники и т.д.)
- Источники света
- Электроустановочные изделия (розетки, выключатели и т.д.)
- Световой дизайн помещений
- Световая реклама

ТРЕТЬЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ
ВЫСТАВКА

**СВЕТ
И СВЕТОТЕХНИКА
2000**

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ВЫСТАВОЧНЫЙ КОМПЛЕКС ЛЕНЭКСПО

В рамках выставки планируется проведение семинаров и круглых столов с привлечением ведущих специалистов, презентации фирм и специализированных изданий

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Литературный редактор А.М. Мескина

Сдано в набор 22.11.99. Подписано в печать 28.12.99. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 53

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в АООТ «Электропривод»

107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, к. 3

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

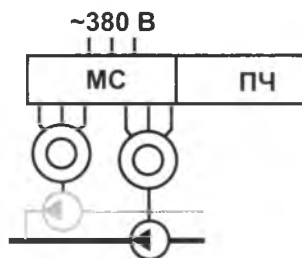
ЭНЕРГО-РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЕ КОМПЛЕКТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ ЦТП

(ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КЭУ)

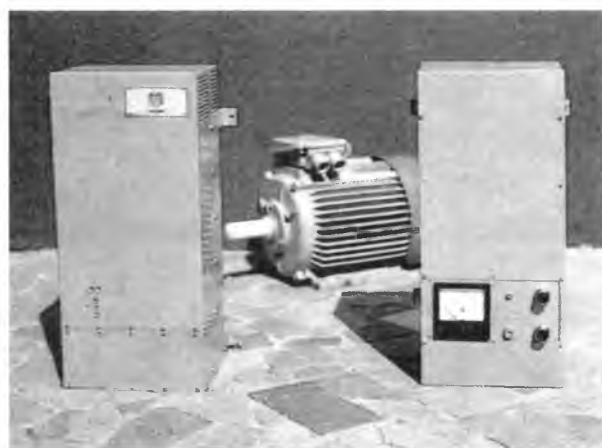
Позволяет снизить расход воды, электроэнергии и тепла в системах водоснабжения жилых и административных зданий за счет оптимального регулирования скорости вращения центробежных насосов с асинхронными электродвигателями мощностью 7,5–45 кВт.

Предлагается комплектное устройство, включаемое в схему действующих и вновь вводимых насосных установок. В составе устройства два конструктивных блока:

- транзисторный преобразователь ПЧ для регулирования частоты и напряжения на двигателе в диапазонах 5—70 Гц и 0—380 В соответственно, имеющий все виды встроенных защит;
- модуль сопряжения МС, позволяющий управлять несколькими насосами и обеспечивающий бесперебойное водоснабжение.



При указанной эффективности устройств их установка окупается за 6—7 месяцев. Эксплуатация устройств подтвердила их высокую надежность, простоту и удобство обслуживания.



По фактическим результатам эксплуатации шести устройств, находящихся в штатной эксплуатации на ЦТП жилых и административных зданий района «Лефортово» с 1995 г., на однотипных насосах с двигателями мощностью 15 кВт получены следующие усредненные показатели эффективности:



Изготовитель: Опытный завод при МЭИ

Разработчик: Кафедра АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЭИ

**Оказываем консультации и техническую помощь,
связанные с внедрением и эксплуатацией данных устройств**

111250, Москва, Красноказарменная, 14

Тел.: (095) 362-74-25, факс: (095) 273-13-48

E-mail: aepmain@aep.mpei.ac.ru

Подписывайтесь на журнал «Вестник МЭИ»!

Теоретический и научно-практический журнал «Вестник МЭИ»

является источником информации о достижениях научной школы **Московского энергетического института (технического университета)**, он адресован российским и зарубежным специалистам в области энергетики, электротехники, электромеханики, машиностроения, радиоэлектроники, автоматики, вычислительной техники и др.

В журнале публикуются материалы фундаментальных и прикладных исследований, современные инженерные решения, гипотезы и научная полемика.

Основной авторский контингент сотрудники МЭИ, что, однако, не исключает публикации актуальных и значимых материалов, представленных авторами из других организаций — российских и зарубежных.

Журнал выходит с января 1994 г. Периодичность издания — 6 номеров в год, объем одного номера 120—140 с.

Журнал распространяется по подписке

Стоимость подписки на журнал на первое полугодие 2000 г. — 105 руб., на год — 210 руб.

Вы можете оформить подписку на журнал, прислав по адресу Издательства МЭИ заявку и заверенную в Сбербанке квитанцию о переводе соответствующих сумм на расчетный счет Издательства МЭИ.

Подписку можно оформить также через отделения Роспечати:

на первое полугодие 2000 г. — индекс **73071**;

годовая подписка — индекс **71676**.

Реквизиты Издательства МЭИ

ИНН 7722013322

Расчетный счет: 40502 81053812010 0041,
МБ АК СБ РФ Лефортовское ОСБ № 6901,
кор. сч. 301018106 0000 000 0342,
БИК 044525342

ОКОНХ 87100, **ОКПО** 04883284

Адрес: Россия, 111250, Москва,
Красноказарменная ул., 14

Телефон: (095) 361-16-81 (редакция журнала),

(095) 361-63-60 (дирекция издательства)

Факс: (095) 362-02-13

Электронная почта: publish@admin.mpei.ac.ru

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Вестник МЭИ»
и/или выслать _____ экземпляров журнала

Фамилия, имя, отчество _____

Организация _____

Название, адрес (с почтовым индексом)

2000 год

1 2 3 4 5 6



ISSN 0013-5860 Электротехника. 2000. № 2. 1-64.