

Тенденции развития общепромышленных электроприводов переменного тока на основе современных устройств силовой электроники

Панкратов В.В.

В статье обсуждаются основные тенденции и актуальные задачи развития современных систем общепромышленного асинхронного электропривода, структуры силовых преобразователей электрической энергии, особенности «бездатчиковых» алгоритмов управления, аспекты «интеллектуальности» преобразователей частоты.

Введение

Регулируемые, позиционные и следящие электроприводы (ЭП), выполняющие управляемое преобразование электрической энергии в энергию механического движения рабочих органов, являются основным исполнительным звеном систем автоматизации промышленных механизмов, машин и технологических установок. Такое совмещение в одном техническом устройстве функций автоматического управления технологическим процессом и преобразования видов энергии позволяет с той или иной степенью условности разделить все системы электропривода по принципам построения и внутренней оптимизации на два основных класса.

1. «Силовые» ЭП, основной функцией которых является управляемое преобразование электрической энергии в полезную механическую работу. Такие системы проектируются из соображений наилучшего использования установленной мощности силового оборудования ЭП — полупроводниковых преобразователей электрической энергии и, собственно, электрической машины — в установившихся режимах при удовлетворении, как правило, не очень жестких требований к показателям качества переходных процессов и точности регулирования. Среди «силовых» систем можно выделить общепромышленные и, в том числе, т.н. энергосберегающие ЭП, работающие, в основном, в статических режимах с медленно изменяющейся нагрузкой. Законы управления последними ЭП оптимизируются по одному из распространенных технико-энергетических критериев: критерию минимума тока потребления, минимума мощности потерь и т.д.

2. «Информационные» ЭП, главной функцией которых является предельно точное и, следовательно, быстродействи-

ющее воспроизведение координатами механического движения рабочих органов заданных пространственных траекторий. Такие системы работают преимущественно в переходных процессах, и энергия в них циркулирует (за вычетом потерь) между электрическими формами и кинетической энергией движущихся масс. Отсюда очевидны и критерии оптимизации «информационных» ЭП: предельное быстродействие, статическая и динамическая точность.

Независимо от назначения ЭП в настоящее время во многих отраслях промышленности лидирующие позиции прочно заняли системы переменного тока на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД) и синхронных двигателей с магнитоэлектрическим («информационные» ЭП) или электромагнитным («силовые» системы) возбуждением. Это стало возможным благодаря достижениям последних десятилетий в области теории электрических машин и электроприводов переменного тока, теории автоматического управления многосвязными нелинейными динамическими объек-

тами, созданию современных, полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов, развитию микроэлектронных и микропроцессорных средств управления и обработки информации.

О структуре преобразовательной части регулируемого электропривода переменного тока

Современный регулируемый ЭП массового применения, как правило, содержит двухзвенный преобразователь частоты (ПЧ) с неуправляемым или полуправляемым выпрямителем. Выпрямитель нагружен на транзисторный автономный инвертор напряжения, работающий в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ) или релейно-векторного управления с частотой не менее 1...2 кГц [1, 2]. Такая структура ПЧ позволяет независимо от режима работы электропривода обеспечить достаточно высокий коэффициент мощности силовой цепи по первой гармонике, а при реализации законов векторного управления — наилучшие динамические и статические показатели системы регулирования, однако не обеспечивает рекуперации в сеть энергии генераторного торможения двигателя. С созданием биполярных транзисто-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Панкратов Владимир Вячеславович окончил Электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института в 1988 г. Докторскую диссертацию на тему «Методы синтеза систем автоматического управления электроприводами переменного тока, малочувствительных к изменениям параметров» защитил в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) в 1997 г. В настоящее время — профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок НГТУ, работает в области оптимального управления сложными электромеханическими системами в условиях неопределенности при ограниченных энергетических ресурсах. Подготовил 3 кандидатов наук. Автор более 100 научных трудов, 5 учебных пособий, 5 изобретений.



ров с изолированным затвором (модулей IGBT) и интегральных схем управления ими (драйверов) область применения ЭП с транзисторными преобразователями стала практически неограниченной. Уже в начале 90-х годов многими фирмами серийно производились транзисторные асинхронные электроприводы мощностью до 350 кВт (напряжение 0,4 кВ), а в 1995-96 гг. появились коммерческие предложения по системам с номинальной мощностью до 1...1,5 МВт. В настоящее время обыденным явлением стали транзисторные ЭП мощностью в несколько мегаватт на напряжения до 10 кВ.

Для обеспечения рекуперативного торможения ЭП входной выпрямитель двухзвенного ПЧ может быть выполнен как реверсивный вентильный преобразователь с раздельным управлением, работающий с неизменными малыми углами регулирования и инвертирования. В групповых (многодвигательных) ЭП также используются специальные тиристорные рекуператоры, однако гармонический состав сетевых токов в обоих случаях дополнительно ухудшается и, так же, как и при неуправляемом выпрямителе, не удовлетворяет требованиям современных стандартов. Зарубежные производители в данной связи рекомендуют использовать пассивные устройства улучшения формы потребляемых и рекуперированных токов – входные синус-фильтры, однако это довольно дорогостоящие элементы с часто неприемлемыми массогабаритными показателями.

Большие надежды в плане повышения электромагнитной совместимости сис-

тем ЭП переменного тока с питающей сетью возлагаются на полностью управляемые активные выпрямители напряжения и тока в составе двухзвенных ПЧ, двухзвенные непосредственные преобразователи частоты и матричные преобразователи [2, 3].

Устройства плавного пуска АД и синхронных двигателей с короткозамкнутой обмоткой на роторе управляемыми электроприводами, по сути, не являются и используются для ограничения пусковых токов нерегулируемых ЭП, снижения таким образом электрических нагрузок на питающую сеть, защиты двигателей от сверхтоков и длительной токовой перегрузки, бесконтактного управления процессами пуска и останова. Построенные на базе полупроводниковых тиристорных, они реализуют принцип фазового или квазичастотного регулирования напряжения, имеют весьма ограниченную область применения и в настоящей статье не рассматриваются.

Особенности общепромышленного частотно-регулируемого электропривода

С ходом технического прогресса все большую остроту приобретает глобальная проблема энергосбережения, обусловленная не только ростом потребления электроэнергии в промышленности и в быту и связанной с ним необходимостью строительства и ввода в эксплуатацию новых энергетических мощностей,

но и ограниченностью мировых запасов природных ресурсов. Так как среди потребителей электрической энергии доминируют электромеханические преобразователи, главным путем решения указанной проблемы является внедрение во все отрасли народного хозяйства систем регулируемого электропривода, которые признаны в мировой практике одной из наиболее эффективных энергосберегающих и ресурсосберегающих экологически чистых технологий. По оценке специалистов, в целом по стране внедрение регулируемого ЭП в энергетике, промышленности и других отраслях может обеспечить ежегодную экономию 35...40 млрд. кВтч электроэнергии, что эквивалентно годовой выработке тридцати энергоблоков мощностью по 300 МВт каждый [4]. Высокая эффективность применения систем автоматизированного электропривода для регулирования параметров и оптимизации режимов работы различных технологических систем с механизмами, работающими при переменных нагрузках, особенно насосных и вентиляционных установок, подтверждена многолетним мировым опытом.

В массовых «силовых» системах регулируемого электропривода, применяющихся в настоящее время в промышленности, системах тепло- и водоснабжения и работающих, в основном, в продолжительных статических режимах с постоянным либо медленно изменяющимся моментом нагрузки, наибольшее распространение получили синхронные и, в особенности, асинхронные электроприводы, потребляющие более половины всей вырабатываемой электроэнергии [5]. Абсолютное преобладание АД в массовом электроприводе можно объяснить его относительной дешевизной и высокой надежностью, обусловленными отсутствием щеточно-коллекторного узла, контактных колец и постоянных магнитов, простотой конструкции и технологичностью, малыми габаритами и моментом инерции ротора, отсутствием коммутационных ограничений по скорости и току и т.д. [6].

Впервые задача сохранения близких к номинальным показателей функционирования АД при частотном регулировании была решена в основополагающей работе М.П. Костенко еще в 1925 г. С тех пор многие исследователи неоднократно обращались и продолжают обращаться к проблеме энергетической оптимизации статических режимов работы ЭП.

Большой вклад в решение задач оптимизации режимов работы электроприводов переменного тока внесли выдающиеся отечественные и зарубежные ученые – М.М. Ботвинник, И.Я. Браславский,



В.Н. Бродовский, А.А. Булгаков, А.М. Вейнгер, Г.В. Грабовецкий, Л.Х. Дацковский, Н.Ф. Ильинский, В.И. Ключев, В.А. Мищенко, Г.Б. Онищенко, В.В. Рудаков, Ю.А. Сабинин, О.В. Слежановский, Ю.Г. Шакарян, Р.Т. Шрейнер, В.А. Шубенко, А. Abbondanti, F. Blaschke, W. Flöter, J. Holtz, R. Jötten, W. Leonard, T.A. Lipo, R.D. Lorenz, D.W. Novotny и др.

Наибольшее распространение в практике построения систем автоматического управления (САУ) асинхронным электроприводом, реализующих заданные статические показатели, на раннем этапе получил простейший пропорциональный закон управления амплитудой напряжения статора в функции его частоты вида $U/f = \text{const}$. Однако, как показано в [6], при таком законе управления невозможно одновременно обеспечить удовлетворительные механические и энергетические характеристики ЭП в широком диапазоне изменений частоты вращения и нагрузки вследствие влияния активного сопротивления и индуктивности рассеяния статора АД. В этой связи еще в 60-х годах наметился переход от элементарного U/f – алгоритма к более сложному, получившему название частотно-токового управления, при котором в обмотках фаз статора формируется трехфазная система синусоидальных токов, амплитуда, частота и фаза которых зависят от требуемых значений момента и потокосцепления двигателя, а также текущего значения частоты вращения или положения ротора [7].

Наиболее перспективным в настоящее время является принцип векторного управления асинхронным ЭП [8], позволя-

ющий рассматривать АД как двухканальный объект (аналог двигателя постоянного тока с независимым возбуждением) в координатной системе, ориентированной по одному из векторов потокосцеплений, и независимо воздействовать на продольную (намагничивающую) и поперечную (мометообразующую) составляющие вектора токов статора для управления магнитным состоянием машины и электромагнитным моментом соответственно. Это принципиально важно для ЭП подъемно-транспортных механизмов, предъявляющих повышенные требования к динамичности САУ по возмущающему воздействию. При построении систем векторного управления асинхронными ЭП, в том числе САУ электромагнитным моментом АД, используются два принципиально различных подхода, называемые непосредственным и косвенным ориентированием вектора управляющих воздействий по направлению магнитного поля двигателя (непосредственное и косвенное полеориентирование) [9]. При непосредственном полеориентировании (Direct Field-Oriented Control – FOC) по результатам обработки текущей информации о доступных прямым измерениям переменных (напряжениях, токах, иногда – частоте вращения двигателя) производится оценивание компонент вектора потокосцеплений ротора в неподвижной системе координат (α, β) , через которые затем определяются мгновенные значения направляющих $\cos \gamma_{\psi}$ и $\sin \gamma_{\psi}$, используемые в преобразованиях координат. Косвенное ориентирование по полю (Indirect FOC, Feedforward FOC) производится без обра-

ботки информации о мгновенных токах и напряжениях двигателя путем вычисления оценки фазы вектора потокосцеплений ротора интегрированием суммы электрической частоты вращения и оценки частоты скольжения или сложением электрического угла поворота ротора с интегралом частоты скольжения.

Широкое распространение в промышленности получили как традиционные системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода с датчиком положения или частоты вращения на валу АД, так и «бездатчиковые» системы, в которых оценка частоты вращения формируется либо на основании информации о токах и напряжениях двигателя на выходе преобразователя частоты, либо как разность между частотой питающего напряжения и оценкой частоты скольжения. Основным требованием, предъявляемым к современным электроприводам общего назначения (общепромышленным ЭП), является обеспечение при относительной статической ошибке менее 5...20% диапазонов регулирования скорости: в бездатчиковом варианте – до 100, при наличии датчика скорости – до 10000.

Таким образом, особый интерес для исследователей и разработчиков представляет оптимизация установившихся режимов работы регулируемых электроприводов на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором по различным технико-энергетическим критериям, осуществляемая именно в рамках законов векторного управления современными полностью управляемыми преобразователями электроэнергии электроприводов при неполных измерениях.

Как известно, оптимизация режимов работы АД по технико-энергетическим критериям (самыми распространенными среди которых являются критерий минимума тока статора, обеспечивающий максимальную перегрузочную способность ЭП и наименьшую мощность потерь в активных сопротивлениях обмотки статора АД и преобразователя частоты, а также критерий минимума суммарных потерь системы «ПЧ – АД») связана с необходимостью изменений магнитного состояния двигателя в зависимости от текущего значения момента сопротивления нагрузки. При классическом «скалярном» частотном регулировании это обуславливает неприемлемо низкие динамические показатели оптимизированных систем ЭП и препятствует их широкому применению на практике. Следовательно, актуальна задача построения алгоритмов управления АД, позволяющих в условиях ограничений, присущих силовой части ЭП, совместить статическую оптимизацию (экстремальное регулиро-



вание) с быстродействием, достаточным для большинства электроприводов общего назначения.

Автор работы [10] выделяет два основных подхода к решению задачи энергооптимизации. Первый подход характеризуется тем, что задача оптимизации режимов ЭП рассматривается с точки зрения приближения к экстремальному значению какого-либо одного показателя качества (однокритериальная постановка). При втором задаче оптимизации решается с привлечением нескольких показателей качества (многокритериальная постановка). Особенность этого, развиваемого автором настоящей статьи, подхода заключается в том, что одним из используемых является динамический критерий [11]. В качестве него выбран критерий метода непрерывной иерархии [12], требующий максимальной мгновенной скорости затухания квадратичной формы ошибок регулирования (по частоте вращения ЭП и потокоцеплению ротора АД) в условиях ограничения евклидовой нормы вектора управляющих воздействий (ресурса преобразователя частоты по выходному току), что при относительном порядке объекта управления, с достаточной степенью точности равно единице, близко к оптимизации по быстродействию [9, 12, 13].

Питающийся от полупроводникового преобразователя частоты асинхронный двигатель, магнитное состояние которого изменяется в соответствии с законами экстремального регулирования, является существенно нелинейным и нестационарным динамическим объектом, что, в свою очередь, требует обеспечения малой чувствительности динамических и статических характеристик системы ЭП к изменениям режима работы САУ и параметрическим возмущениям. Эта задача может быть эффективно решена в рамках квазинепрерывных алгоритмов управления, при разработке которых могут применяться две группы методов. Первую группу составляют методы синтеза систем с разделяющимися многотемповыми процессами, предназначенные для достижения высокой динамической точности и малой чувствительности САУ к параметрическим возмущениям при неизменной структуре и постоянных параметрах управляющей части системы. Во вторую группу входят методы компенсационно-параметрического типа, предельным случаем которых является метод обратной модели, основанный на адаптации САУ к параметрическим возмущениям, что так же, как и решение задачи наблюдения неизмеряемых координат (потокоцеплений АД и частоты вращения), требует обязательной идентификации всех существенно переменных па-

раметров объекта управления и их квазистационарности.

Распространено мнение о том, что свойства электроприводов переменного тока как объектов экстремального управления исследованы недостаточно полно. Отсутствуют практически реализуемые алгоритмы, обеспечивающие энергооптимальные режимы ЭП в условиях малой априорной информации о параметрах силовой части. Известные алгоритмы управления требуют знания параметров электрической машины и не учитывают их возможных изменений. Все это препятствует внедрению экстремальных законов в практику управления установившимися режимами ЭП переменного тока, что, как показывает анализ, при сравнительно малых затратах на реализацию указанных алгоритмов с помощью современной микропроцессорной техники может дать дополнительный экономический эффект.

Существует два пути решения этой проблемы: а) автоматический поиск в процессе функционирования ЭП экстремума целевой функции технико-энергетического критерия, оцениваемой по результатам текущих измерений, что характеризуется низким быстродействием; и б) не имеющая этого недостатка реализация заранее определенных оптимальных соотношений координат двигателя с текущей идентификацией определяющих их переменных параметров объекта управления. Таким образом, задачи текущей идентификации координат состояния АД и экстремального регулирования необходимо рассматривать комплексно.

Элементы «интеллектуальности» в общепромышленном частотно-регулируемом электроприводе

Стремительно расширяющийся круг функциональных требований, предъявляемых к автоматизированным системам электромеханического преобразования энергии в промышленности, на транспорте, в спецтехнике, ужесточающиеся требования к динамическим характеристикам таких систем и их энергетической эффективности обуславливают необходимость построения алгоритмов управления, которые по тем или иным признакам могут быть названы «интеллектуальными». Общеизвестно, что синтез таких алгоритмов в настоящее время составляет центральную проблему современной теории автоматического управления электроприводами. Конфликт между явно недостаточной методической основой построения «интел-

лектуальных» алгоритмов управления ЭП и растущими возможностями аппаратной части приобретает все большую остроту, поскольку современное состояние средств силовой и информационной электроники уже позволяет реализовать элементы «интеллектуальности» (Intelligent Control) даже в сравнительно недорогих серийных САУ. Признаком «интеллектуальности» управляемого преобразователя электрической энергии для систем электропривода, по мнению автора, является не использование «экзотических» методов (нечеткая логика, нейронные сети, генетические алгоритмы и т.п.), как это часто преподносится, а функциональная полнота в решении основных задач современной теории управления в приложении к таким сложным объектам, как общепромышленный электропривод. «Интеллектуальность» в данном смысле – это обеспечение комфортного интерфейса между человеком и микропроцессорной САУ ЭП, минимум настраиваемых вручную параметров ЭП, но ни в коем случае не способность к самостоятельной постановке и решению новых нестандартных задач.

Ярким примером «интеллектуальных» алгоритмов может служить оптимальное управление процессами электромеханического преобразования энергии «в большом», подчиненное некоторой конечной цели. «Интеллектуальность» оптимального управления обусловлена тем, что большинство ЭП представляют собой существенно нелинейные объекты, функционирующие в условиях неопределенности (в широком смысле). Во-первых, сами электрические машины являются «серь-



ми ящиками», параметры которых интервально неопределенны и могут изменяться не только от процесса к процессу, но и в темпе основных движений САУ. Во-вторых, далеко не все координаты состояния ЭП доступны для непосредственного (прямого) измерения. В этой связи при синтезе САУ ЭП разработчик вынужден в той или иной мере использовать методы идентификации, восстановления и адаптации. Восстановление необходимой информации о неизмеряемых координатах и переменных параметрах ЭП в процессе управления традиционно осуществляется посредством алгоритмов текущей идентификации на основе адаптивных моделей объекта, начальные приближения параметров которых определяются в ходе предварительной идентификации [14]. Здесь необходимо отметить, что в силу сложности математических моделей ЭП ни один из известных подходов пока не принес общего или сколько-нибудь универсального решения проблем управления такими системами. Именно этим объясняется обилие публикаций, посвященных различным структурным решениям, и масса ограничений, присущих каждому из них.

Особенно важными задачи идентификации и адаптивного управления становятся при построении общепромышленных частотно-регулируемых электроприводов, одним из основных требований к которым является отказ от использования внешних по отношению к управляемому источнику электрической энергии (ПЧ) датчиков, в том числе датчиков непосредственно регулируемых координат механического движения.

Автоматическое вычисление некоторых параметров АД перед каждым запуском электропривода способны обеспечить различные алгоритмы предварительной («Off-line») идентификации. Наряду с известными способами пассивной предварительной идентификации, опирающейся на характерные особенности переходных процессов (например, «перелом» кривой тока в переходном процессе предварительного намагничивания АД), широко применяются активные алгоритмы, использующие специальные тестовые воздействия. Основное преимущество последних заключается в возможности минимизировать или полностью исключить влияние определенных параметров, в том числе и неидеальностей инвертора, и, наоборот, выделить влияние интересующего параметра, подавая на двигатель воздействия требуемой формы. Следует отметить, что компенсация неидеальностей инвертора или обеспечение грубости алгоритма по отношению к ним очень важны, поскольку на этапе предва-

рительной идентификации используются относительно низкие уровни напряжений. Оценки условно постоянных параметров, полученные в ходе предварительной идентификации, используются при настройке системы управления (Self-tuning Control), а оценки параметров, существенно изменяющихся в процессе работы ЭП, вводятся в качестве начальных приближений в алгоритмы текущей идентификации.

Замкнутые алгоритмы текущей («On-line») идентификации, как правило, реализуют идеи метода настраиваемых моделей (Model Reference Adaptive Systems) [15] по отношению к процессам вычисления оценок неизмеряемых координат и могут также быть использованы для адаптации регуляторов САУ к существенно переменным параметрам двигателя. Отметим, что данное высказывание относится и к адаптивным наблюдениям полного порядка [16], которые в зарубежной литературе выделяют в отдельный класс. В идеале вычислению «On-line» подлежат активное сопротивление статора, индуктивные параметры двигателя и «постоянная» времени цепи ротора. Здесь, как и в ходе предварительной идентификации, могут использоваться тестовые воздействия, однако в энергосберегающих ЭП средней и большой мощности их применение нежелательно.

Заключение

В качестве выводов по представленному материалу предлагается выделить следующие основные тенденции развития систем общепромышленного электропривода переменного тока на современном этапе.

1. Развитие силовой части ЭП и алгоритмов управления ПЧ идет в направлении улучшения электромагнитной совместимости электроприводов с питающей сетью. В скором времени следует ожидать, что для ЭП среднего диапазона мощностей неперенными станут требования качества потребления и рекуперации энергии.

2. Все более прочные позиции завоевывают «бездатчиковые» системы, основанные на автоматическом определении параметров двигателя как объекта управления и адаптивной текущей идентификации координат состояния ЭП.

3. При построении цифровых алгоритмов управления общепромышленных электроприводов все более широкое применение будут находить современные методы идентификации, адаптации и методы синтеза САУ, малочувствительных к изменениям параметров.

Литература:

1. Харитонов С.А., Берестов В.М. Анализ синусоидальной ШИМ с натуральной выборкой (методический аспект) // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. Частина 2. – Київ. – 2002. – С. 31 – 37.
2. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000.
3. L. Gyugyu, B.R. Pelly, «Static Power Frequency Changers», Wiley, New York, 1976.
4. Сахарнов Ю.В. Регулируемый электропривод – эффективное энергосберегающее оборудование // Энергетика Тюменского региона. – 2002. – №1(15). – С. 26 – 35.
5. Ильинский Н.Ф. Регулируемый электропривод. Энерго- и ресурсосбережение // Приводная техника. – 1997. – № 3. – С. 21 – 23.
6. Сандлер А.С., Сарбатов Р.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: «Энергия», 1974.
7. Бродовский В.Н., Иванов Е.С. Приводы с частотно-токовым управлением / Под ред. В.Н. Бродовского. – М.: Энергия, 1974.
8. Blaschke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens Zeitschrift, 1971, Bd. 45. – Н. 10. – S. 757 – 760.
9. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999.
10. Поляков В.Н. Состояние теории и практики оптимального управления стационарными режимами электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями // Труды III Международной (XIV Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу (Нижегород, 12-14 сентября 2001 г.) – Нижний Новгород: «Вектор-Тис», 2001. – С. 68 – 69.
11. Панкратов В.В., Зима Е.А. Многокритериальная оптимизация систем векторного управления асинхронными электроприводами // Электричество. – 2002. – № 4. – С. 40 – 46.
12. Панкратов В.В. Метод синтеза многосвязных автоматических систем с ограниченной нормой вектора управляющих воздействий и его применение в задачах электропривода // Мехатроника. – 2000. – № 5. – С. 32 – 41.
13. Панкратов В.В., Зима Е.А. Энергооптимальное векторное управление асинхронными электроприводами. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.
14. Панкратов В.В. Метод синтеза алгоритмов текущей идентификации на основе адаптивных моделей // Автоматизированные электромеханические системы / Новосибир. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 1997. – С. 15 – 30.
15. C. Schauder, «Adaptive speed identification for vector control of induction motor without rotational transducers», in Conf. Rec. 1989 IEEE IAS Ann. Mtg., pp. 493 – 99.
16. H. Kubota, K. Matsuse, and T. Nakano, «DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor», IEEE Trans. Industry Appl., vol. 29, no. 2, 1993, pp. 344 – 348.