

перестроювання автокомпенсатора при стохастичній реконфігурації схеми ЕТК в процесі захисного відключення.

1. Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С., Шидловська Н.А., Шкрабець Ф.П. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / За ред. акад. Півняка Г.Г. — Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2004. — 334 с.

2. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. — М.: Недра, 1982. — 152 с.

3. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 744 с.

4. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. — М.: Недра, 1980. — 334 с.

5. Чернов И.Я., Ландкоф Л.Б. и др. Энергоснабжение высокопроизводительных угледобывающих комплексов // Уголь Украины. — 2002. — №9.

6. Шкрабець Ф.П., Шидловська Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Є.А. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях. — Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2003. — 151 с.

7. Ягудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. Защита от электропоражения в горной промышленности. — М.: Недра, 1982. — 152 с.

Надійшла 04.06.2008

УДК 621.313.17

К.П.АКИНИН, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН України, Київ)

Особенности и принципы построения электроприводов на базе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей

Рассмотрены тенденции развития, особенности и принципы построения регулируемых электроприводов на базе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей.

Розглянуто тенденції розвитку, особливості та принципи побудови регульованих електроприводів на базі безконтактних магнитоелектричних двигунів.

Введение. История развития электроприводов на базе так называемых вентильных двигателей исчисляется уже многими десятилетиями. В [25] отмечено, что вентильные двигатели с дискретной коммутацией (тиратронные моторы) появились в 1930-х годах. Наиболее динамичный этап развития таких электроприводов во второй половине XX века был связан с появлением высококоэрцитивных постоянных магнитов и дальнейшим совершенствованием транзисторов и интегральных микросхем.

За это время трудами уже нескольких поколений исследователей и разработчиков накоплен огромный теоретический и практический материал [7, 10, 12, 13, 23, 25]. Однако, на каждом этапе развития электроприводов появляются новые возможности для их технической реализации, становится возможным получение новых, недоступных ранее регулировочных и эксплуатационных

характеристик двигателей, а это, в свою очередь, расширяет области возможного практического использования электроприводов, например, в медицине и приборостроении. Таким образом, всегда имеется основание для осмысления современного состояния вопроса о рассматриваемых электроприводах.

В настоящее время тенденции развития электроприводов на базе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей определяют такие факторы:

1. Повышение энергоемкости постоянных магнитов.
2. Улучшение свойств материалов для магнитопроводов.
3. Совершенствование технологии и повышение качества изготовления подшипников и других конструктивных элементов двигателей.
4. Появление многократно- и внутрисхемно-программируемых микроконтроллеров, мощных

полупроводниковых приборов типа IGBT и MOSFET, малогабаритных пассивных и активных электронных элементов для поверхностного монтажа.

5. Совершенствование компоновочных решений двигателей, схемотехнических решений силовых преобразователей и систем управления, а также алгоритмов управления.

Применение новых высококоэрцитивных постоянных магнитов позволило повысить индукцию в зазоре электрической машины и расширить температурный диапазон ее функционирования [7]. Новые материалы для магнитопроводов также способствуют повышению индукции, кроме того, определяют возможность получения приемлемого низкого уровня потерь в двигателе от вихревых токов на заданной частоте вращения. Это обстоятельство, а также наличие качественных подшипников позволяет повысить максимально допустимую частоту вращения ротора двигателя [7, 17].

Достижения современной электроники определяют тенденции снижения потерь и повышения частоты преобразования электрической энергии в силовом преобразователе — инверторе, а также повышения частоты обработки информации в микроконтроллере, что позволяет реализовать новые эффективные алгоритмы управления двигателем. Существование быстродействующих силовых транзисторов и специальных драйверов для управления затворами транзисторов позволяет значительно упростить решение схемотехнических задач при разработке силовых преобразователей. Миниатюризация электронных элементов позволяет уменьшить габариты блоков управления и, как отмечает ряд авторов, конструктивно совместить в одном корпусе элементы двигателя, датчиков положения и частоты вращения ротора, а также силового преобразователя и системы управления [7, 11, 25].

При рассмотрении особенностей построения электромеханических датчиков перемещения [16] отмечена еще одна важная тенденция, заключающаяся в том, что достижения микроэлектроники позволяют снизить требования к технологической составляющей погрешности изготовления электромеханических конструкций.

Таким образом, в современном электроприводе в единое целое интегрируются достижения нескольких областей науки и техники.

При изучении литературы по исследуемой теме можно обратить внимание на многообразие терминов и путаницу в их определении. Для некоторых известных типов двигателей и электроприводов на их основе приняты достаточно четкие определения, отражающие конструктивные признаки или принципы управления, например, двигатель (электропривод) постоянного тока или асинхронный двигатель (электропривод). В то же время для рассматриваемого типа двигателей и электроприводов широко используется ряд непохожих

друг на друга названий и терминов: вентильный двигатель (ВД), вентильный двигатель с постоянными магнитами (ВДПМ), двигатель с вентильным режимом работы, бесконтактный двигатель постоянного тока (БДПТ), синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ). Им соответствуют англоязычные аналоги: brushless DC motor (drive) (BLDCM, BLDCD), interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), PM brushless DC motor (drive).

Перечисленные термины представляются не совсем точными. Использование определения "вентильный" может быть справедливо для обозначения любого устройства, содержащего, например, транзисторы. Использование этого термина для определения режима работы двигателя не вполне корректно. "Вентильный режим работы двигателя" следовало бы определить как режим работы двигателя с зависимым инвертором или коммутатором (для краткости можно определить как "зависимый режим"), как это происходит, например, в машине двойного питания с зависимым преобразователем в роторе или в двигателе постоянного тока, где функцию зависимого коммутатора выполняет механический коллектор со щетками.

Термин БДПТ также не совсем точный, поскольку в обмотках двигателя протекают переменные токи, а постоянный ток протекает только в звене постоянного тока силового преобразователя. В аббревиатуре СДПМ прилагательное "синхронный" относится к определению режима работы двигателя при принудительном задании частоты питающих токов или напряжений. Вентильный двигатель, который конструктивно может быть полным аналогом синхронной машины с постоянными магнитами, по принципу работы существенно от нее отличается [18].

Более приемлемым для обозначения рассматриваемых двигателей является термин: бесконтактный магнитоэлектрический двигатель (БМД), где прилагательные "бесконтактный" и "магнитоэлектрический" определяют такие важные особенности двигателя как отсутствие механических контактов и возбуждение магнитного потока с помощью постоянных магнитов. Для обозначения электропривода на базе БМД можно использовать аббревиатуру: ЭПБМД.

Важной особенностью БМД является возможность работы в нескольких режимах [15, 18, 25].

При синхронном режиме работы БМД электронный преобразователь работает как автономный инвертор, причем частота ЭДС и угловая скорость вращения двигателя соответствуют принудительно заданной частоте тока или напряжения питания, а величина фазового сдвига между ЭДС и током статора является свободной координатой и определяется величиной механической нагрузки. Особенности этого режима работы БМД являются склонность к качаниям ротора, опасность выпадения из синхронизма и трудность пуска.

В обсуждаемом выше зависимом (вентильном) режиме работы двигателя преобразователь или коммутатор, управляющий статорными обмотками, синхронизируется с ЭДС статора. При этом фазовый сдвиг между ЭДС и током поддерживается на постоянном, близком к нулю уровне, в то время как величина тока в статорной обмотке пропорциональна моменту механической нагрузки.

Электромеханическое преобразование энергии с заданными параметрами может быть выполнено многими способами, выбор одного из которых в каждом конкретном случае решается на основании экономических, технических, конструктивных или других критериев. Пожалуй, главная особенность БМД, используемого в рассматриваемом электроприводе, заключается в том, что для возбуждения магнитного потока в активной зоне электрической машины используются постоянные магниты, с помощью которых в относительно малом объеме возможно достижение сравнительно высоких значений плотности магнитной энергии [9]. В настоящее время для этой цели используются высококоэрцитивные интерметаллические соединения редкоземельных металлов, наиболее известными из которых являются соединения $NaFeB$ и $SmCo_5$. При этом влияние токовой обмотки на состояние магнита практически отсутствует, что обуславливает стационарный закон распределения магнитной индукции в зазоре электрической машины. Если асинхронный двигатель или двигатель постоянного тока могут вращаться после подключения соответственно к сети переменного тока или к источнику постоянного напряжения, то для функционирования БМД требуется использование специальных силовых преобразователей и систем управления.

Кроме БМД в состав рассматриваемого электропривода входят элементы блока управления: силовой преобразователь параметров электрической энергии; система информационного обеспечения, в том числе система первичных датчиков, на основании выходных сигналов которых формируют управляющие воздействия; система управления, обеспечивающая формирование напряжений и токов в статорных обмотках и регулирование выходной переменной двигателя — углового положения, частоты вращения ротора или момента двигателя.

Рассмотрим особенности ЭПБМД и обозначим ряд принципов построения перечисленных составных частей электропривода. Причем заметим, что логика формирования указанных принципов определяется некоторым основным принципом электропривода, который можно сформулировать как принцип обеспечения эффективного управления движением приводного механизма с заданными требованиями и ограничениями. При этом, техническое задание на разработку электропривода может определять ряд требований, например, точ-

ность, диапазон и быстродействие регулирования, а также стоимость, габариты, характеристики окружающей среды и другие.

Эффективность преобразования энергии в ЭПБМД. Исторически сложилось так, что разработка БМД, как и двигателей других типов, стала задачей, решаемой специалистами по электрическим машинам. Поскольку вопросы создания элементов блока управления находятся в компетенции специалистов по электроприводе и автоматизации, то при разработке электропривода двигатель совместно с механизмом рассматривается как объект регулирования с заданными свойствами и параметрами. При этом успешное создание ЭПБМД достигается при условии согласования параметров и характеристик БМД и блока управления.

Залогом корректного решения поставленной задачи является обеспечение высокой эффективности электромеханического преобразования энергии в двигателе.

Первое условие для достижения этой цели обеспечивается на стадии проектировании двигателя с учетом заданных в техническом задании параметров и ограничений путем выбора определенных пропорций как для магнитной системы, так и для контуров обмоток [8, 10]. Кроме того, эффективность преобразования энергии связана с выполнением требования совпадения по форме и фазовому сдвигу ЭДС и тока обмотки. Форма кривой ЭДС, наводимой в обмотке, может быть синусоидальной или отличаться от таковой, приближаясь либо к треугольной форме, либо к трапециoidalной. В [2] рассмотрены случаи формирования моментных характеристик БМД при различных вариантах описания ЭДС и токов.

В ЭПБМД малой мощности (единицы и десятки Ватт) для упрощения и удешевления системы управления нередко реализуют алгоритм шестикратной коммутации транзисторов инвертора [1]. При такой коммутации ток в обмотке имеет в идеализированном представлении прямоугольную с нулевой полкой форму [2], либо, в зависимости от параметров обмотки двигателя и частоты вращения, форма кривой тока может приобретать более или менее выраженный трапециoidalный характер также с нулевой полкой. В [1, 2] при сравнении вариантов взаимодействия ЭДС синусоидальной формы и токов разной формы, но с одинаковыми действующими значениями, показано, что, упрощая алгоритм и схему управления путем использования шестикратной коммутации инвертора, приходится жертвовать величиной развиваемого момента не менее, чем на 4,3 %.

Таким образом, эффективность преобразования энергии с помощью БМД определяется принципом обеспечения максимума развиваемого момента, из которого следуют как конструктивные принципы построения активной зоны двигателя, так и принципы формирования токов в его обмотках.

Как уже отмечалось во введении, на современном уровне развития электроники вопросы построения силового преобразователя малой и средней мощности решаются настолько эффективно, что в данной статье нет необходимости их рассматривать. Можно отметить только, что в ЭПБМД формирование токов в статорных обмотках и их регулирование достаточно эффективно осуществляется посредством мостового инвертора напряжения.

Информационное обеспечение ЭПБМД. При заданном или выбранном объекте регулирования (системе БМД — механизм) важным этапом разработки ЭПБМД является построение системы информационного обеспечения электропривода, позволяющей получать сигналы положения и частоты вращения ротора для формирования заданного тока в обмотке и регулирования выходных координат двигателя. По этому поводу в [21] отмечается важный принцип единого информационного обеспечения, в соответствии с которым сигналы положения и частоты вращения получают от одного первичного датчика.

Опыт исследований и эксплуатации электроприводов показал, что при построении системы информационного обеспечения ЭПБМД целесообразно соблюдать такие принципы, в том числе и сформулированные автором.

1. Принцип достаточного минимума первичной информации о положении ротора. При определении понятия минимума первичной информации о положении ротора будем полагать, что первичный датчик фиксирует моменты равенства электрического угла поворота ротора заданным значениям угла $\varphi_i = 2\pi \cdot i/N$, где $i=1, 2, 3, \dots, N$; $N=2pt$; p — число пар полюсов; t — количество фаз двигателя. При $p=1$ и $t=3$ имеем всего шесть импульсов датчика за один оборот вала ротора. Первичные дискретные сигналы могут быть получены либо посредством энкодера, реализованного с помощью дискретных датчиков Холла [22], либо с помощью системы дискретных датчиков ЭДС статора [5, 14].

2. Принцип простоты конструктивного исполнения датчика текущего положения ротора. Такому требованию соответствуют датчики Холла, располагаемые в корпусе двигателя совместно с его активными элементами и используемые как датчики магнитного поля. В [6] определены варианты использования первичных выходных сигналов датчиков Холла: пары ортогональных дискретного и аналогового или пары квазиортогональных аналоговых сигналов. При этом требования к точности установки датчиков могут быть занижены за счет усложнения алгоритмов математической обработки сигналов. Здесь соблюдается принцип информационного единства при формировании сигналов положения и частоты вращения двигателя из исходных сигналов первичного датчика [3, 6].

3. Принцип непосредственного измерения текущих координат двигателя: положения и частоты вращения ротора, токов и напряжений статора, где для их измерения предполагается использование специальных датчиков. В этом случае имеем наиболее полную и точную информацию о состоянии двигателя, однако, за счет усложнения системы датчиков и повышения их стоимости.

4. Принцип формирования сигналов положения и частоты вращения ротора без применения внешних датчиков. При этом угловое положение ротора определяется приближенно, не с помощью дополнительного дорогостоящего фотоэлектрического или электромеханического датчика, а косвенно по измерениям токов и напряжений статорных обмоток двигателя [20].

Заметим, что система по п.2 занимает промежуточное положение между системами, соответствующими п.3 и п.4. Действительно, благодаря датчикам магнитного поля, установленным в воздушном зазоре магнитной системы, получаем возможность формирования непрерывного сигнала текущего положения ротора без использования специального внешнего датчика углового перемещения.

Выбор варианта системы информационного обеспечения ЭПБМД определяется с одной стороны, требованиями технического задания, с другой — выбором по возможности наиболее простого способа формирования сигналов углового положения и частоты вращения ротора. Такой выбор является важным этапом создания ЭПБМД, поскольку точность измерения определяет стоимость и сложность устройства, а характер сигналов определяет особенности разработки системы автоматического регулирования (САР).

Особенности регулирования выходных координат БМД. После того, как определен способ формирования исходных сигналов датчиков, должна решаться задача регулирования выходных координат БМД: формирования токов в статорных обмотках и синтеза САР углового положения или частоты вращения ротора. Принципы формирования токов были рассмотрены выше при анализе условий эффективного электромеханического преобразования энергии. Обзор путей построения САР выходит за рамки данной статьи. Однако можно заметить, что выбор варианта построения САР выходной координаты БМД определяется требованиями технического задания, а также характером и набором исходных сигналов датчиков, то есть в зависимости от этих обстоятельств синтезируемая САР должна рассматриваться как линейная или нелинейная, дискретная или непрерывная, стационарная или система с изменяющимися параметрами.

Рассмотрим некоторые особенности построения систем управления, определяемых принципами регулирования выходных координат БМД и вытекающих из принципов информационного обеспечения ЭПБМД.

1. При использовании минимально доступной дискретной информации о положении ротора формируются $2m$ интервалов повторяемости работы инвертора в течение одного периода тока статора и сглаженный сигнал, соответствующий частоте вращения ротора. В этом случае при синтезе САР необходимо учитывать импульсный характер сигналов датчиков [4]. Несмотря на ограниченность исходной информации датчиков, обусловленную дискретным характером сигналов, даже при количестве импульсов датчика за один оборот, равном шести, достигается удовлетворительное регулирование частоты вращения БМД в диапазоне ее изменения приблизительно 500...40000 об/мин. Случай использования дискретных датчиков ЭДС статора можно определить как вариант реализации дискретного бездатчикового управления БМД.

2. При непрерывном формировании сигнала положения ротора с помощью датчиков магнитного поля достигается важный результат — объединение в одном устройстве элементов как измерительной системы, так и системы электромеханического преобразования энергии — электрического двигателя. Такому техническому решению, тем не менее, свойственны недостатки: параметры выходных сигналов датчиков Холла могут отличаться или быть нестабильными вследствие разброса параметров датчиков, разброса параметров магнитных систем, влияния температуры, кроме того, возможно нарушение желаемой ортогональности при установке двух датчиков. Конечно, данная система формирования сигналов уступает по точности конструктивно более сложным импульсным фотоэлектрическим или электромеханическим синусно-косинусным датчикам [16, 21]. Однако, за счет использования специальных алгоритмов обработки сигналов в этом случае достигается получение диапазона регулирования частоты вращения БМД, равного нескольким тысячам.

3. В случае непосредственного измерения текущих координат двигателя возможна реализация векторного управления БМД. Такое управление основывается на преобразовании текущих переменных статора, представленных в системе координат статора, в систему координат d и q , жестко связанную с ротором. Математическая модель БМД в системе координат d и q [26] имеет вид

$$L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + pL\omega i_q + u_d; \quad L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - pL\omega i_d - k_m \omega + u_q; \quad J \frac{d\omega}{dt} = k_m \cdot i_q - M_C; \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega,$$

где i_d, i_q, u_d, u_q — статорные токи и напряжения в системе координат ротора d и q ; R, L — активное сопротивление и индуктивность обмотки статора; p — число пар полюсов; k_m — коэффициент момента двигателя; J — момент инерции; M_C — момент

нагрузки; ω — частота вращения; α — угол поворота ротора. Важным следствием, вытекающим из рассмотрения данной математической модели и определяющим принципы построения регулятора, является необходимость выполнения условия $i_d = 0$, соответствующего равенству нулю угла между векторами ЭДС и тока статора. После получения d и q составляющих исходных переменных, в соответствии с принятым законом регулирования формируют d и q составляющие управляющих воздействий, которые затем преобразуют в управляющие сигналы инвертора напряжения, функционирующего в системе координат статора. Использование наиболее полной и точной информации об угле поворота ротора, частоте вращения и токах статора позволяет реализовать наиболее качественное управление БМД, заключающееся в точном формировании заданных токов статора, получении максимального диапазона регулирования частоты вращения или возможности достижения точной отработки задания положения в следящей системе [19].

4. При бездатчиковом приближенном формировании сигналов положения и частоты вращения ротора за счет измерений токов и напряжений статорных обмоток двигателя реализуют получившие в последнее время распространение системы бездатчикового векторного управления БМД (sensorless control) [20, 24, 26]. Вследствие появления погрешности при определении угла поворота данный подход не может быть применен в нижней части диапазона регулирования частоты вращения.

Выводы. Таким образом, процесс построения ЭПБМД определяют принципы построения БМД, систем информационного обеспечения ЭПБМД и регулирования выходных координат БМД, обозначающих три важных этапа решения задачи создания ЭПБМД. Можно отметить, что первые два этапа мало зависят один от другого. Действительно, для любого БМД может быть выбрана почти любая система информационного обеспечения. Выполнение третьего этапа, напротив, полностью зависит от предыдущих двух. Построение системы регулирования выходных координат БМД, как уже отмечалось, определяется полнотой исходной информации о состоянии двигателя, характером выходных сигналов датчиков, а также параметрами БМД и механической нагрузки, обуславливающими настройки САР.

Рассмотренные варианты построения ЭПБМД отличаются один от другого стоимостью и сложностью технической реализации как системы первичных датчиков, так и аппаратной части системы управления, обеспечивающей обработку исходных сигналов и формирование управляющих воздействий силового преобразователя.

При построении регулируемого ЭПБМД следует руководствоваться принципом максимальной простоты механической конструкции электропривода за счет, если это необходимо, усложнения ал-

горитмов управления и обработки сигналов, реализуемых с помощью микроконтроллера системы управления. Упрощение конструкции предполагает в первую очередь отказ от использования дорогостоящих и габаритных датчиков угловых перемещений и допустимого снижения требований к точности установки датчиков магнитного поля.

1. Акинин К.П., Антонов А.Е., Киреев В.Г. Бесконтактный магнитоэлектрический двигатель с инвертором напряжения // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. — 2007. — №2(17). — С. 24—29.

2. Акинин К.П., Антонов А.Е., Киреев В.Г. К вопросу формирования моментных характеристик магнитоэлектрических двигателей // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. — 2003. — №2(5). — С. 62—67.

3. Акинин К.П. Способы определения частоты вращения ротора двигателя на основании периодических функций угла поворота вала // Техн. електродинаміка. — 2006. — №6. — С. 51—53.

4. Акинин К.П. Сравнение способов построения импульсных систем регулирования частоты вращения бесконтактных магнитоэлектрических двигателей // Техн. електродинаміка. — 2008. — №3. — С. 45—51.

5. Акинин К.П. Условия работы бесконтактного магнитоэлектрического двигателя с дискретными датчиками ЭДС // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч.2. — С. 38—39.

6. Акинин К.П. Формирование сигналов на основании периодических функций угла поворота // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. — 2008. — №20. — С. 57—61.

7. Антонов А.Е., Киреев В.Г., Акинин К.П. Концепция построения беспазовых электрических машин магнитоэлектрического типа и электроприводов на их основе // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. — 2005. — №2(11). — С. 99—103.

8. Антонов А.Е., Киреев В.Г. Построение оптимальных магнитных систем беспазовых магнитоэлектрических двигателей // Техн. електродинаміка. — 2003. — №4. — С. 38—40.

9. Антонов А.Е., Петухов И.С. Сравнительный анализ систем возбуждения электромеханических преобразователей // Техн. електродинаміка. — 2007. — №6. — С. 44—47.

10. Афонин А.А., Гребенников В.В. Исследования в области развития электромеханических преобразователей энергии линейного и ротационного движения // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. — 2005. — №2(11). — С. 95—98.

11. Афонин А.А. Подходы к проектированию исполнительных устройств мехатроники // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. — 2002. — №2(2). — С. 52—60.

12. Бесконтактные двигатели постоянного тока с транзисторными коммутаторами / И.Е.Овчинников, Н.И.Лебедев — Л.: Наука, 1979. — 270 с.

13. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Старовойтова Н.П. Кафедра "Электроэнергетические и электромеханические системы"

Московского авиационного института // Электричество. — 2002. — №5. — С. 2—10.

14. Воронин С.Г. Управление коммутацией вентильного двигателя по сигналам ЭДС вращения // Электричество. — 2000. — №9. — С. 53—59.

15. Денисов А.И., Заровский Р.В., Турок А.Н. Режимы работы вентильных двигателей // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2007. — Ч.4. — С. 84—87.

16. Журавский О.В. Коррекция погрешностей электромеханических датчиков угла для аналого-цифрового преобразования // Измерительная техника. — 1991. — №4. — С. 11—12.

17. Куликов Н.И., Елизарова Т.А., Куликова Т.В., Сухов Д.В., Хруначев О.Ю. Исследование и разработка быстродействующих вентильных двигателей // Электричество. — 2002. — №5. — С. 11—21.

18. Овчинников И.Е. Теория вентильных электрических двигателей. — Л.: Наука, 1985. — 164 с.

19. Попович Н.Г., Пересада С.М., Коломиец Д.Н. Глобальное управление синхронным следящим электроприводом // Труды конференции: "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". — Харьков: Основа. — 1997. — С. 45—48.

20. Сарычев А.П., Портной Ю.Т., Раскин Л.Я., Аскарин Д.В. Векторное бездатчиковое управление электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический университет". Выпуск 45. "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". — 2005. — С. 45—46.

21. Смирнов Ю.С. Многокомпонентные аналого-цифровые преобразователи перемещений с синусно-косинусными датчиками // Измерительная техника. — 1991. — №4. — С. 14—16.

22. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Н.П.Адволаткин, В.Т.Гращенко, Н.И.Лебедев и др. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — 160 с.

23. Gieras J.F., Gieras I.A. Electric motors and drive — perspectives. — 4th international conference on Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems. June 15—17, 1999, St. Petersburg, Russia. — Vol.1. — Pp. 47—58.

24. Haque E., Zhong L., Rahmani M. A sensorless initial rotor position estimation scheme for a direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive // IEEE Transactions on Power Electronics. Nov, 2003. — Vol.18 — Pp. 1376—1383.

25. Koskin J.P., Mikierov A.G. Electrical mechatronics-mean problems and some samples. — 2nd international scientific and technical conference on Unconventional Electromechanical and Electrotechnical Systems. Desember 15—17, 1996, Szczecin and Miedzdroje, Poland. — Vol.2. — Pp. 259—262.

26. Obana Hiruoki, Ota Yuji, Miki Ichiro. A position sensorless control method of interior permanent magnet synchronous motor // Electrical Machines and Systems, ICEMS, Proceeding of the Eighth International Conference. Sept, 2005. — Vol.1 — Pp. 215—220.

Надійшла 02.04.2008