

УДК 621.314

Экспериментальное исследование асинхронного электропривода с релейно-векторным принципом управления при непосредственном измерении параметров магнитного поля

А.П. Шатков

ГОУВПО «Вологодский государственный технический университет», г. Вологда, Российская Федерация
E-mail: a-shatkov@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Существующие методы релейно-векторного управления асинхронным электроприводом для стабильной работы требуют сложных блоков наблюдения параметров и адаптации. В связи с этим актуальной является задача разработки высококачественной системы управления электроприводом, обеспечивающей стабильную работу независимо от условий эксплуатации.

Материалы и методы: Исследования проведены на математической модели электропривода с релейно-векторным управлением и измерением магнитного поля машины и опытным образце электропривода с использованием метода натурального эксперимента.

Результаты: Разработана математическая модель электропривода с релейно-векторным управлением и измерением магнитного поля машины. Представлены результаты натурных испытаний, проведенных на опытном образце электропривода. Показано, что результаты натурных испытаний соответствуют данным, полученным на модели.

Выводы: Разработанный электропривод позволяет обеспечить высокое качество регулирования, надежность и инвариантность к возмущающему воздействию, что делает перспективным его внедрение в такие сферы промышленности, где электрооборудование должно сохранять свои высокие показатели качества даже при тяжелых условиях эксплуатации.

Ключевые слова: преобразователь частоты, асинхронный двигатель, непосредственное управление моментом, измерение магнитного поля, датчик Холла.

Experimental Research of Asynchronous Electric Drive with Relay-vector Control Principle at Immediate Parameters Measurement of Magnetic Field

A.P. Shatkov

Vologda State Technical University, Vologda, Russian Federation
E-mail: a-shatkov@mail.ru

Abstract

Background: The existing methods of relay-vector control of the asynchronous electric drive require the complex monitoring and adaptation options for stable work. According to it, the problem of developing the high-quality control system of electric drive for stable work despite of the operation conditions is urgent.

Materials and methods: The researches are carried out on the basis of the mathematical model of the electric drive with relay-vector control and measurement of magnetic field of the machine, as well as on the prototype of the electric drive by means of the method of natural experiment.

Results: The mathematical model of the electric drive with relay-vector control and measurement of magnetic field of the machine is developed. The results of natural experiments are similar to those in the model.

Conclusions: The developed electric drive allows providing high quality regulation, reliability and invariance towards the disturbing action to make its implementation more perspective, especially in such fields of industry where electrical equipment should retain high quality indicators even in difficult operation conditions.

Key words: frequency converter, asynchronous motor, direct torque control, magnetic field measurement, Hall sensor.

Момент на валу электрической машины (электродвигателя) образуется благодаря силе, действующей на роторные проводники с током со стороны магнитного поля, создаваемого статором. Следовательно, для точного задания момента в электроприводе требуется измерение величин тока (статора или ротора) и магнитного поля в зазоре машины. Однако в современных системах управления электроприводом характеристики магнитного поля в явном виде отсутствуют, а вычисляются лишь косвенными методами при известных параметрах

электромеханического преобразователя и измеряемых величинах токов и напряжений. В то же время следует учитывать, что значения некоторых параметров нестабильны во время работы электрической машины. Например, существенно могут «плавать» активные сопротивления статора и ротора при нагреве машины. В связи с этим актуальной является задача разработки высококачественной системы управления электроприводом, обеспечивающей стабильную работу независимо от условий эксплуатации.

В статье [1] был предложен принцип релейно-векторного управления асинхронным электроприводом на основе измерения магнитного поля в воздушном зазоре между статором и ротором двигателя. Электропривод, основанный на таком принципе управления, обладает следующими преимуществами:

- структурная простота и надежность, благодаря непосредственному измерению моментаобразующих векторов;
- устойчивость к колебаниям температуры двигателя во время работы;
- отсутствие накапливающихся ошибок интегрирования в системе управления;
- быстрая реакция на изменение момента нагрузки, благодаря использованию принципов прямого управления моментом [2];
- робастность по отношению к измеряемым величинам (потокосцепление, ток статора).

Блок-схема предлагаемой системы управления электроприводом переменного тока с непосредственным разрывным управлением моментом на основе измерения магнитного поля машины представлена на рис. 1.

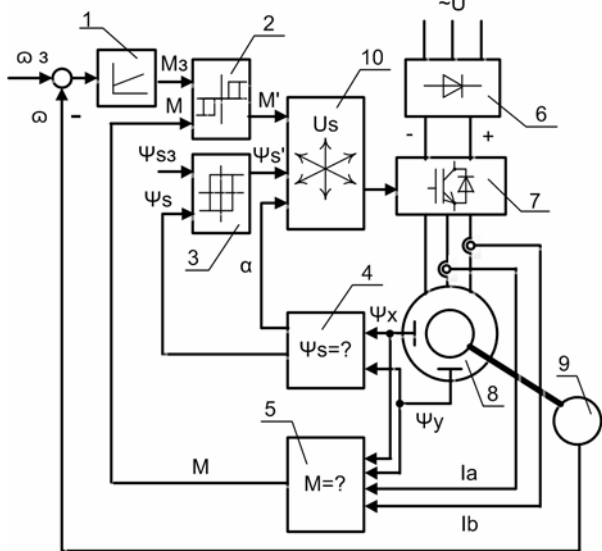


Рис. 1. Структурная схема электропривода с непосредственным управлением моментом на основе измерения магнитного поля машины: 1 – ПИ-регулятор; 2 – регулятор момента; 3 – регулятор потокосцепления статора; 4 – вычислитель потокосцепления статора; 5 – вычислитель момента; 6 – неуправляемый выпрямитель; 7 – автономный инвертор напряжения; 8 – асинхронная машина; 9 – датчик скорости; 10 – таблица оптимальных переключений ключей

Все устройства, показанные на рис. 1, реализуются микропроцессорными средствами. В такой системе управления для повышения быстродействия используются гистерезисные регуляторы момента и модуля потокосцепления, в которых на каждом шаге вычислений сравниваются заданные значения с вычисленными, а полученные логические сигналы выдаются на блок выбора оптимального вектора напряжения. Разделение каналов регулирования скорости и потокосцепления достигается за

счет выбора такого состояния инвертора, которое вызывает изменение как момента, так и потокосцепления в необходимом направлении [2]. Таким образом, промежуточные контуры регулирования проекций тока статора в системе регулирования и широтно-импульсный модулятор в системе управления инвертором в данном случае отсутствуют. С учетом динамических характеристик звена регулирования момента должен синтезироваться как ПИД-регулятор, чем достигается высокое быстродействие по контуру скорости и статическая точность регулирования. Основные характеристики систем прямого управления моментом, позволяющие судить об их высоком быстродействии, а также общие принципы их построения приведены в [2, 3].

На рис. 2 изображена упрощенная структурная схема испытательного стенда электропривода.

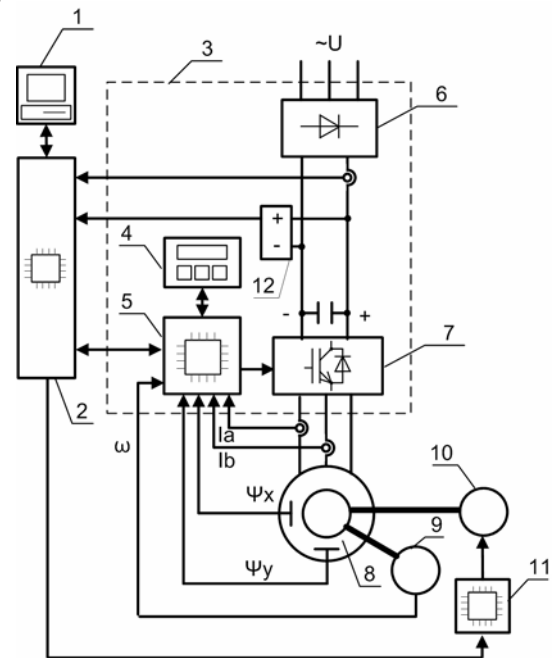


Рис. 2. Упрощенная структурная схема испытательного стенда электропривода с непосредственным управлением моментом на основе измерения магнитного поля машины: 1 – персональный компьютер; 2 – плата сбора данных L-Card; 3 – преобразователь частоты ЭЧР5 4кВт (ПЧ); 4 – пульт оператора ПЧ; 5 – плата системы управления ПЧ; 6 – звено постоянного тока ПЧ (выпрямитель); 7 – автономный инвертор напряжения ПЧ; 8 – асинхронный электродвигатель 4А100L4У3; 9 – импульсный датчик скорости ВЕ-178А (1000 мет/об); 10 – нагрузочная электрическая машина; 11 – система управления нагрузочной машины; 12 – датчик напряжения звена постоянного тока

Согласно схеме (рис. 2), преобразователь частоты 3 приводит в движение асинхронный электродвигатель 8, вал которого жестко соединен с нагрузочной электрической машиной 10 и импульсным датчиком скорости 9. Персональный компьютер 1 служит для сбора данных с датчиков и контроля внутренних переменных системы управления приводом 5. Второй функцией персонального компьютера является

управление нагрузочной машиной 10 через устройство управления 11.

Система управления приводом 5 – это плата преобразователя частоты, в состав которой входит центральный микроконтроллер STM32F103 с программой алгоритма управления приводом. Микроконтроллер обрабатывает сигналы с датчиков тока, потокосцепления, импульсного датчика скорости 9 и формирует необходимые сигналы управления ключами автономного инвертора напряжения 7.

Посредником между персональным компьютером и электроприводом является плата L-card, выполняющая функции ЦАП и АЦП.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя система управления привода рассчитывает, измерив ток статора и магнитное поле в зазоре машины [1, 4]. В векторной форме выражение для момента будет иметь вид

$$M_d = \frac{3}{2} p_n [\bar{I}_s \times \bar{\Psi}'_m], \quad (1)$$

где \bar{I}_s – вектор тока статора; $\bar{\Psi}'_m$ – сопряженный вектор потокосцепления в воздушном зазоре; p_n – количество пар полюсов машины.

Вектор тока статора электрической машины традиционно измеряется с помощью датчиков тока, включенных в фазы двигателя. Для измерения потокосцепления в зазоре из трех предложенных в [1] способов установки датчиков Холла был выбран способ установки в лобовой зоне (рис. 3).

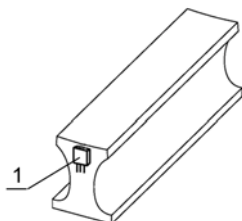


Рис. 3. Способ установки датчика на зубце статора: 1 – пластиковый датчик в лобовой зоне

Датчики Холла позволяют осуществить точную фиксацию положения волны магнитного поля в зазоре машины относительно системы координат, неподвижной по отношению к статору. Сигналы, получаемые с датчиков, соответствуют значению магнитного поля в данный момент в месте установки датчиков. Для того чтобы получить текущие координаты вектора рабочего потокосцепления, необходимо расположить два датчика Холла на зубцах статора электрической машины (рис. 4).

В соответствии с выбором декартовой системы координат (x, y) один из датчиков необходимо устанавливать на магнитной оси фазы А, совпадающей с осью x (рис. 4). Второй датчик теоретически необходимо установить на оси, сдвинутой по отношению к x на угол $\pi/2$, однако практически это осуществить трудно, так как магнитная ось фазы А совпадает с серединой зубца статора, а ось y обычно оказывается расположенной на раскрытии паза. По-

этому используется альтернативный вариант [4] установки второго датчика Холла на магнитной оси фазы В (фазовый сдвиг между напряжением датчиков $2\pi/3$).

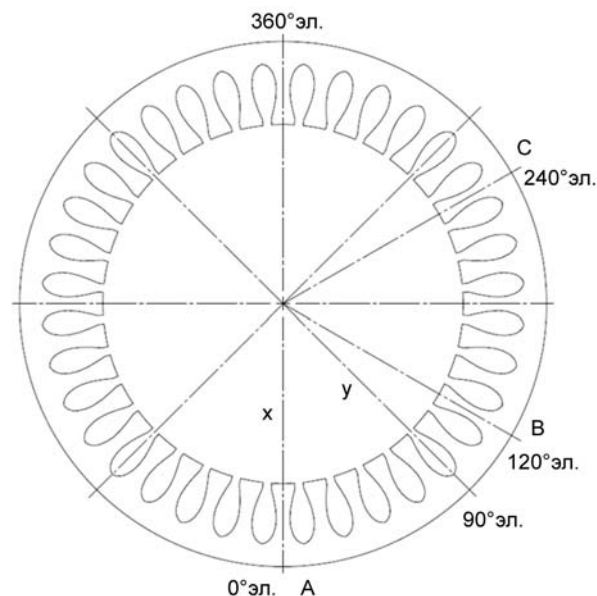


Рис. 4. Разрез статора асинхронного двигателя

На рис. 5 изображены экспериментальные данные, полученные с датчиков Холла SS49E (Honeywell) при холостом ходе двигателя на номинальной скорости 1500 об/мин.

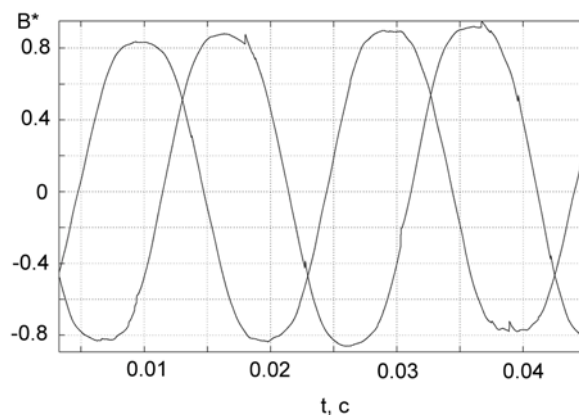


Рис. 5. Данные с датчиков магнитного поля, установленных в торцевой части зубцов статора (система координат [А, В])

Анализ полученных данных (рис. 5) показывает, что сигналы с датчиков расходятся по фазе на угол 120° эл. Также легко заметить, что при установке датчиков Холла в торцевой части зубцов статора сводятся к минимуму пульсации от пазов ротора [4].

Перед проведением экспериментальных исследований разработанного электропривода на стенде (рис. 2) ставились следующие задачи:

- определение точности поддержания скорости в статическом режиме;
- изучение энергоэффективности привода;
- определение скорости реакции электромагнитного момента;

• изучение стабильности работы привода во всем диапазоне рабочих температур электродвигателя.

Эксперименты проводились в два этапа: на «холодном» и «горячем» двигателе. Первая серия экспериментов проводилась при температуре двигателя 20°C, затем двигатель нагревали в печи до 70°C и проводили ту же серию экспериментов.

На рис. 6 изображены диаграммы скорости и потребляемой мощности электропривода в тестовом режиме. В данном случае тестовый режим предполагает:

- намагничивание двигателя (интервал времени на диаграмме 0–1 с);
- разгон двигателя на холостом ходу (1–2 с);
- холостой ход на номинальной скорости 150 рад/с (2–3 с);
- наброс номинальной нагрузки 26 Н*м – включение нагрузочной машины (3–6 с);
- торможение двигателя (4–5 с);
- удержание нулевой скорости с номинальным моментом (5–6 с).

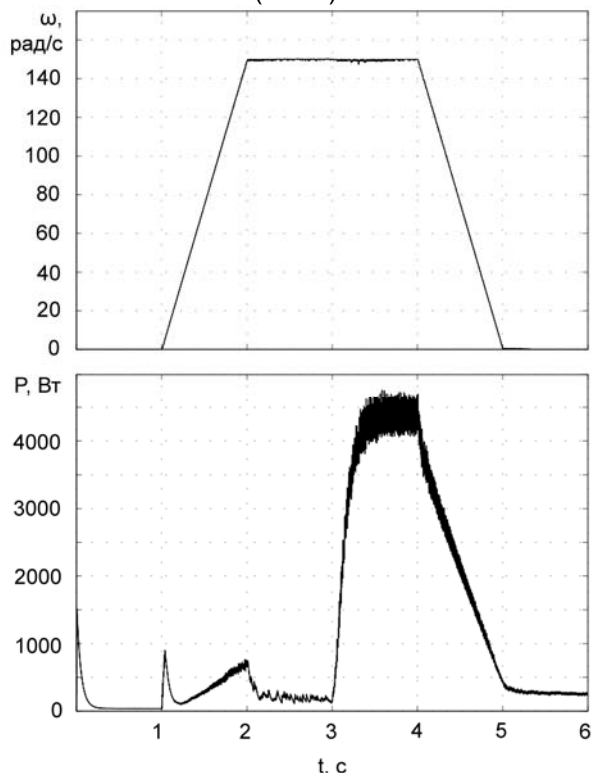


Рис. 6. Диаграммы скорости и потребляемой мощности при температуре двигателя 20°C

Анализ диаграммы скорости (рис. 6) показывает, что электропривод обрабатывает сигнал задания по скорости с высоким качеством. При этом в статических и динамических режимах отклонение скорости от заданного значения не превышает 3 рад/с (ограничено разрешением оптического датчика скорости).

Потребляемая активная мощность электропривода вычисляется на основе измеренного напряжения и тока в звене постоянного тока преобразователя частоты:

$$P_{\text{АКТ}} = U_{3\text{ПТ}} I_{3\text{ПТ}} \quad (2)$$

Результирующий сигнал мощности (рис. 6) отфильтрован апериодическим фильтром первого порядка с частотой среза 20 Гц.

Анализ кривой мощности (рис. 6) показывает, что большая часть потребляемой из сети активной мощности расходуется на совершение полезной работы.

Номинальный коэффициент полезного действия электропривода рассчитывается по формуле

$$\eta_{\text{Н}} = \frac{P_{2\text{Н}}}{P_{1\text{Н}}} \cdot 100\% = \frac{3900}{4450} \cdot 100\% = 87,6\%, \quad (3)$$

где $P_{2\text{Н}} = M_{\text{С}} \omega = 26 \cdot 150 = 3900$ Вт – номинальная выходная мощность в тестовом режиме, Вт; $P_{1\text{Н}}$ – номинальная потребляемая мощность в тестовом режиме, Вт (определяется по рис. 6).

Определение скорости реакции электромагнитного момента производится при заторможенном роторе. При этом тестовый режим определения быстродействия по моменту подразумевает:

- формирование начального момента 1 Н*м при заторможенном роторе для исключения влияния зазоров в механической передаче;
- задание номинального электромагнитного момента 27 Н*м.

Электромагнитный момент в системе управления приводом определяется согласно векторному выражению (1) в реальном времени и табулируется в ОЗУ центрального процессора. После завершения теста центральный процессор передает данные на персональный компьютер посредством последовательного цифрового интерфейса RS-485. На рис. 7 представлен график реакции электромагнитного момента при температуре двигателя 20°C.

Анализ графика (рис. 7) показывает, что время реакции электромагнитного момента на изменение сигнала задания от 1 до 27 Н*м составило не более 1 мс, что соответствует результату, полученному на математической модели [1].

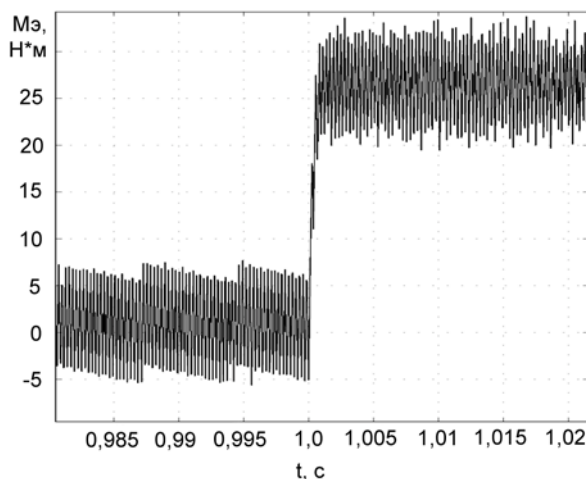


Рис. 7. Реакция электромагнитного момента при температуре двигателя 20°C

После нагрева электродвигателя в печи до 70°C эта же серия экспериментов была проведена еще раз.

На рис. 8 изображены диаграммы скорости и потребляемой мощности электропривода.

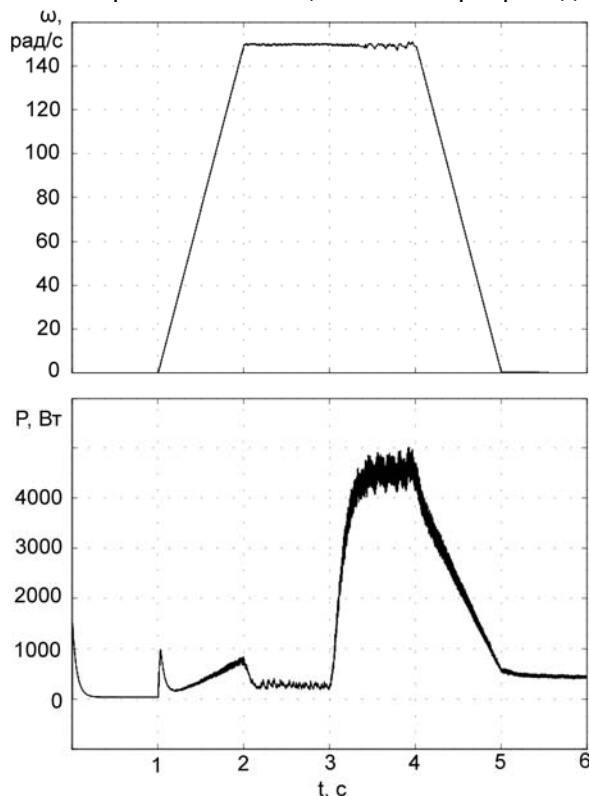


Рис. 8. Диаграммы скорости и потребляемой мощности при температуре двигателя 70°C

В статических и динамических режимах отклонение скорости от заданного значения также не превышает 3 рад/с.

Анализируя кривую мощности (рис. 8), следует отметить, что несколько возросли потери активной мощности. Это связано с увеличением значений активных сопротивлений цепей статора и ротора электродвигателя, что приводит к дополнительным потерям на нагрев.

Номинальный коэффициент полезного действия электропривода рассчитывается как

$$\eta_H = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} \cdot 100\% = \frac{3900}{4600} \cdot 100\% = 84,8\%, \quad (4)$$

где $P_{2H} = M_C \omega = 26 \cdot 150 = 3900$ Вт – номинальная выходная мощность в тестовом режиме, Вт; P_{1H} – номинальная потребляемая мощность в тестовом режиме, Вт (определяется по рис. 8).

На рис. 9 представлен график реакции электромагнитного момента при температуре двигателя 70°C.

Анализ графика (рис. 9) показывает, что время реакции электромагнитного момента на изменение сигнала задания от 1 до 27 Н*м составило не более 2 мс. При нагреве двигателя время реакции по моменту увеличилось, тем не менее соответствует требованиям к системам прямого управления моментом [3].

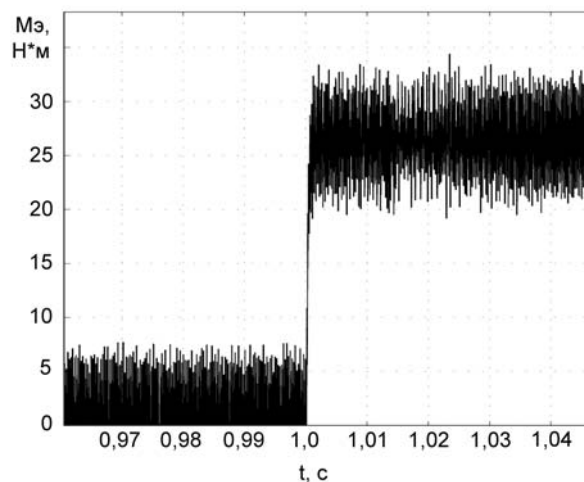


Рис. 9. Реакция электромагнитного момента при температуре двигателя 70°C

Заключение

Благодаря использованию разрывного управления электромагнитным моментом и потокосцеплением, а также непосредственному измерению величины потокосцепления в зазоре и последующему простому вычислению моментобразующих векторов разработанный электропривод имеет сравнительно простую структуру. Минимальное число выполняемых математических операций и отсутствие преобразования координат позволяет реализовывать полученную структуру системы управления даже в недорогих (low-cost) цифровых сигнальных процессорах.

Результаты экспериментального исследования показали, что система непосредственного управления моментом на основе измерения магнитного поля машины устойчива к колебаниям температуры электродвигателя в очень широком диапазоне, так как в вычислениях не используются параметры, подверженные температурному дрейфу. Следовательно, в таком электроприводе отпадает необходимость использования систем адаптации к изменению температуры двигателя, что также упрощает структуру привода по сравнению с современными аналогами.

При определении магнитного потока, а следовательно, и момента в системе управления отсутствует накапливающаяся ошибка интегрирования.

Непосредственное управление моментом обеспечивает сверхвысокую реакцию на управляющее и возмущающее воздействие. Было установлено, что электропривод оказывается не только инвариантным к колебаниям температуры, но и квазиинвариантным к возмущающему воздействию (моменту нагрузки). Так как переходные процессы по управлению электромагнитным моментом длятся не более 1–2 мс, то скорость электропривода не успевает существенно изменить свое значение. Следует отме-

титель, что такие быстрые переходные процессы по электромагнитному моменту не вызывают каких бы то ни было перегрузок преобразователя частоты и электрической машины.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность системы управления приводом во всем диапазоне частот вращения магнитного поля, включая нулевую. Система оказывается работоспособной даже при значительной погрешности определения вектора потокосцепления в воздушном зазоре, что лишним раз подчеркивает надежность электропривода.

Малая зависимость рабочей индукции от мощности машины обуславливает еще одно преимущество электропривода с измерением магнитного поля. Для измерения индукции магнитного поля, лежащей в пределах 0,6–1 Тл, можно использовать один тип датчиков и применять их в приводах любой мощности.

Все перечисленные достоинства разработанного привода способствуют внедрению его в транспорт и другие сферы промышленности, где электрооборудование должно сохранять свои высокие показатели качества даже при тяжелых условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Шатков А.П. Реализация релейно-векторного принципа управления в асинхронном электроприводе при непо-

Шатков Александр Петрович,
Вологодский государственный технический университет,
аспирант кафедры «Управляющих и вычислительных систем»,
e-mail: a-shatkov@mail.ru

средственным измерении параметров магнитного поля // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 52–57.

2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учеб. для вузов. – М.: Академия, 2006. – 267 с.

3. Козярук А.Е., Рудаков В.В. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов. – СПб.: Санкт-Петербургская электротехническая компания, 2004. – 127 с.

4. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартау В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. – 136 с.

References

1. Shatkov, A.P. Realizatsiya releyno-vektornogo printsiipa upravleniya v asinkhronnom elektroprivode pri neposredstvennom izmerenii parametrov magnitnogo polya [Realization of Relay-vector Control Principle in Asynchronous Electric Drive with Immediate Measurement of Magnetic Field Parameters]. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 5, pp. 52–57.

2. Sokolovskiy, G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC Drives with Frequency Regulation]. Moscow, Akademiya, 2006. 267 p.

3. Kozyaruk, A.E., Rudakov, V.V. *Sovremennoe i perspektivnoe algoriticheskoe obespechenie chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov* [Modern and Advanced Knoware of Variable-Speed Electric Drives]. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskaya elektrotekhnicheskaya kompaniya, 2004. 127 p.

4. Rudakov, V.V., Stolyarov, I.M., Dartau, V.A. *Asinkhronnye elektroprivody s vektornym upravleniem* [Asynchronous Electric Drives with Vector Control]. Leningrad, Energoatomizdat, 1987. 136 p.