

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Способ защиты синхронной электрической машины от виткового замыкания: пат. 5381 Респ. Казахстан. № 950943.1; заявл. 18.12.95; опубл. 15.10.97, Бюл. № 4.
2. Способ защиты синхронной электрической машины от витковых и двойных на землю замыканий в обмотке ротора: пат. Респ. Казахстан. № 2008/0456.1; заявл. 21.04.2008; опубл. 15.05.2009, Бюл. № 5.
3. Новожилов А.Н., Полищук В.И. Способ защиты от витковых замыканий в обмотке ротора синхронного генератора // Вестник Павлодарского государственного университета. Сер. Энергетическая. – 2007. – № 2. – С. 53–59.
4. Новожилов А.Н., Полищук В.И. Выбор метода расчета магнитного поля для определения параметров КИП // Известия вузов. Электромеханика. – 1993. – № 7. – С. 37–39.
5. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – 728 с.
6. Новожилов А.Н., Воликова М.П. Коррекция токов в методе зеркальных отражений при моделировании магнитных полей электрических машин // Электричество. – 2004. – № 9. – С. 41–44.
7. Данилевич Я.Б. Добавочные потери в турбо- и гидрогенераторах. – Л.: Наука, 1973. – 214 с.
8. Вольдек А.И., Данилевич Я.Б. Электромагнитные процессы в торцевых частях электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 213 с.
9. Новожилов А.Н. Расчет точечных измерительных преобразователей для защиты синхронного двигателя // Электротехника. – 1995. – № 10. – С. 45–48.

Поступила 10.02.2011 г.

УДК 621.7–5+621.314.521+621.314.572

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ СИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Абд Эль Вхаб Амр Рефки, А.С. Каракулов, Ю.Н. Дементьев, С.Н. Кладиев\*

Томский политехнический университет

\*Северский технологический институт НИЯУ МИФИ

E-mail: amrrefky@sibmail.com

*Представлен сравнительный анализ наиболее популярных систем частотного управления приводов с синхронным двигателем с постоянными магнитами – классической частотно-токовой «векторной» с ШИМ управлением и прямого управления моментом с помощью таблицы переключений на основе релейных регуляторов. Сравнение основано на показателях качества регулирования, таких, как точность регулирования координат и время реакции на изменение управляющих и возмущающих воздействий, затрат вычислительных ресурсов микропроцессорной системы управления, сложности реализации и частоты коммутации вентилей инвертора.*

### Ключевые слова:

*Векторное управление, прямое управление моментом, частотно-регулируемый электропривод, синхронный двигатель с постоянными магнитами, сравнительный анализ.*

### Key words:

*Vector control, direct torque control, frequency control of electric drive, permanent magnets synchronous motor, comparison analysis.*

### Введение

В последнее время синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) привлекают повышенный интерес в связи с их активным использованием в промышленных электроприводах. Высокая эффективность, малые массогабаритные показатели при больших значениях крутящих моментов в сравнении с приводами с асинхронными двигателями делают такие привода хорошей альтернативой системе «преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель». Кроме того, доступность недорогих электронных компонентов и высокие технические характеристики СДПМ позволяют использовать их в прецизионных устройствах электропривода [1, 2]. Общеизвестно, что две наиболее подходящие для таких приводов системы управления – это векторное управление (ВУ) и прямое управление моментом (ПУМ). Эти системы были разработаны в 70–80-х гг. XX в. Обе системы кон-

тролируют момент и магнитный поток для точной отработки заданной траектории движения, несмотря на изменение параметров двигателя и нагрузки при различных возмущающих воздействиях. Такие системы управления регулируемого электропривода находят применение в промышленных установках, хотя до настоящего времени нет единого мнения, какая из них лучше [2–5].

Цель данной статьи – на основе всестороннего анализа статических, динамических, эксплуатационных свойств указанных выше систем управления выявить их преимущества и оптимальные области применения.

### Постановка задачи

Для сравнительного анализа работы систем управления частотно-регулируемого электропривода на базе СДПМ, а именно ВУ и ПУМ, необходимо разработать имитационные модели систем

в среде Simulink MatLab и провести исследования режимов их работы.

Уравнения динамики электромеханической и механической характеристик СДПМ во вращающейся системе координат приведены в статье [6].

**Описание схем векторного управления и прямого управления моментом**

**А. Векторная система управления**

Принцип управления привода с СДПМ основан на ориентации вектора магнитного потока  $\Psi$ . Так как магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами ротора, жестко связан с положением вала ротора, положение вектора потока может быть определено по положению вала ротора. Если ток  $I_d=0$ , то потокосцепление  $\Psi_d$  по оси  $d$  постоянно. Поскольку потокосцепление в СДПМ постоянно, электромагнитный момент  $M_3$  пропорционален току  $I_q$ , который определяется замкнутой системой управления [5, 6]. Проекция магнитного потока ротора на ось  $q$  равна нулю, в то время как вектор тока имеет проекции на обе оси  $d$  и  $q$ . Ввиду того, что вырабатываемый двигателем момент прямопропорционален току по оси  $q$ , и поток ротора по оси  $d$  постоянен, может быть достигнут максимальный момент на единицу тока [3]:

$$M_3 = \frac{3}{2} p_n \Psi_p I_q,$$

$$M_3 = k_t I_q,$$

где  $p_n$  – число пар полюсов;  $\Psi_p$  – потокосцепление ротора;  $k_t$  – коэффициент пропорциональности момента,  $k_t = \frac{3}{2} p_n \Psi_p$ .

**В. Прямое управление моментом**

С тех пор, как была впервые предложена система ПУМ для асинхронных двигателей, прошло три десятилетия. В настоящее время данная система применяется и для других типов двигателей переменного тока. Основная идея ПУМ для асинхронных двигателей – это управление моментом и потокосцеплением за счет выбора подходящего пространственного вектора напряжения, которое основывается на связи скольжения и момента. В конце 1990-х гг. была создана система прямого управления моментом для СДПМ [4], рис. 1. Данная схема имеет ПИ-регулятор скорости и два регулятора гистерезисного типа.

**Определение момента и потокосцепления**

Основной принцип ПУМ – выбор вектора напряжения по заранее заданной таблице значений. Этот принцип реализован при помощи гистерезисных регуляторов потокосцепления статора и момента. Потокосцепление статора в общем случае находится так [5]:

$$\Psi_c(t) = \int_0^t (U_c - R_c I_c) dt + \Psi_{c0},$$

где  $\Psi_c, \Psi_0$  – потокосцепление статора и его начальное значение.

Заменим расчётное значение напряжения статора истинной величиной и запишем его как:

$$U_c(S_a, S_b, S_c) = \frac{2}{3} U_{DC} (S_a + S_b e^{j(2\pi/3)} + S_c e^{j(4\pi/3)}),$$

где  $S_a, S_b, S_c$  – показывают состояние выводов трех фаз, 0 означает отрицательное напряжение, а 1 – положительное.

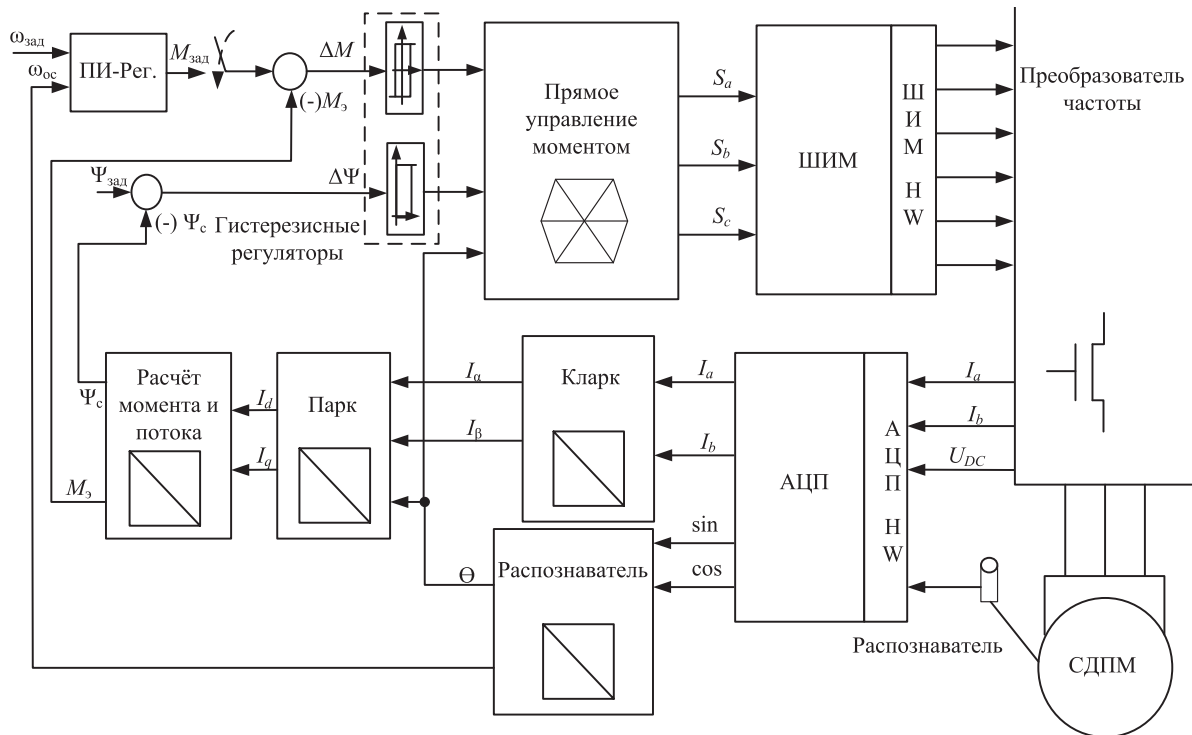


Рис. 1. Функциональная схема системы прямого управления моментом СДПМ:  $\Psi_{зад}$  – сигнал задания потокосцепления статора

Пространственный вектор тока статора рассчитывается по измеренным токам в фазах  $i_a, i_b, i_c$ .

$$i_c = \frac{2}{3} (i_a + i_b e^{j(2\pi/3)} + i_c e^{j(4\pi/3)}).$$

Составляющие по осям  $\alpha$  и  $\beta$  вектора  $\Psi_c$  могут быть получены как:

$$\begin{cases} \Psi_{c\alpha} = \int_0^t (U_{c\alpha} - R_c I_{c\alpha}) dt; \\ \Psi_{c\beta} = \int_0^t (U_{c\beta} - R_c I_{c\beta}) dt. \end{cases}$$

Потокосцепление статора:

$$\Psi_c = \sqrt{\Psi_{c\alpha}^2 + \Psi_{c\beta}^2},$$

и фаза потокосцепления статора:

$$\theta_c = \arctg \frac{\Psi_{c\beta}}{\Psi_{c\alpha}}.$$

Электромагнитный момент может быть получен по уравнению:

$$M_3 = \frac{3}{2} p_n (\Psi_{c\beta} I_{c\alpha} - \Psi_{c\alpha} I_{c\beta}).$$

На рис. 2 представлена схема имитационной модели системы прямого управления моментом для электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами.

Плоскость, в которой находится вектор напряжения, разделена на 6 секторов, и каждый вектор разделяет каждый сектор на две части. В каждом секторе могут быть использованы четыре из шести ненулевых вектора напряжения. Также доступны два нулевых вектора. Все возможные варианты векторов представлены в таблице переключений [5]. Компаратор вычисления момента использует три величины: «-1» означает, что действующее значение момента выше заданного и находится за пределами гистерезиса; «1» означает, что действующее значение момента ниже заданного и находится за пределами гистерезиса, «0» означает, что действующее значение момента равно заданному и находится в пределах гистерезиса, аналогичная система регулирования применяется для контроля потокосцепления [6].

Используемые нами модели отличаются от ранее опубликованных тем, что позволяют:

- изменять частоту дискретизации расчётов блоков модели для исследования влияния этого параметра на частоту переключений вентилей инвертора;
- учитывать особенность формирования широтно-импульсной модуляции (ШИМ) современными сигнальными микропроцессорами серии Motor Control (для векторных систем управления);
- учитывать особенности алгоритмической реализации управляющего программного обеспечения.

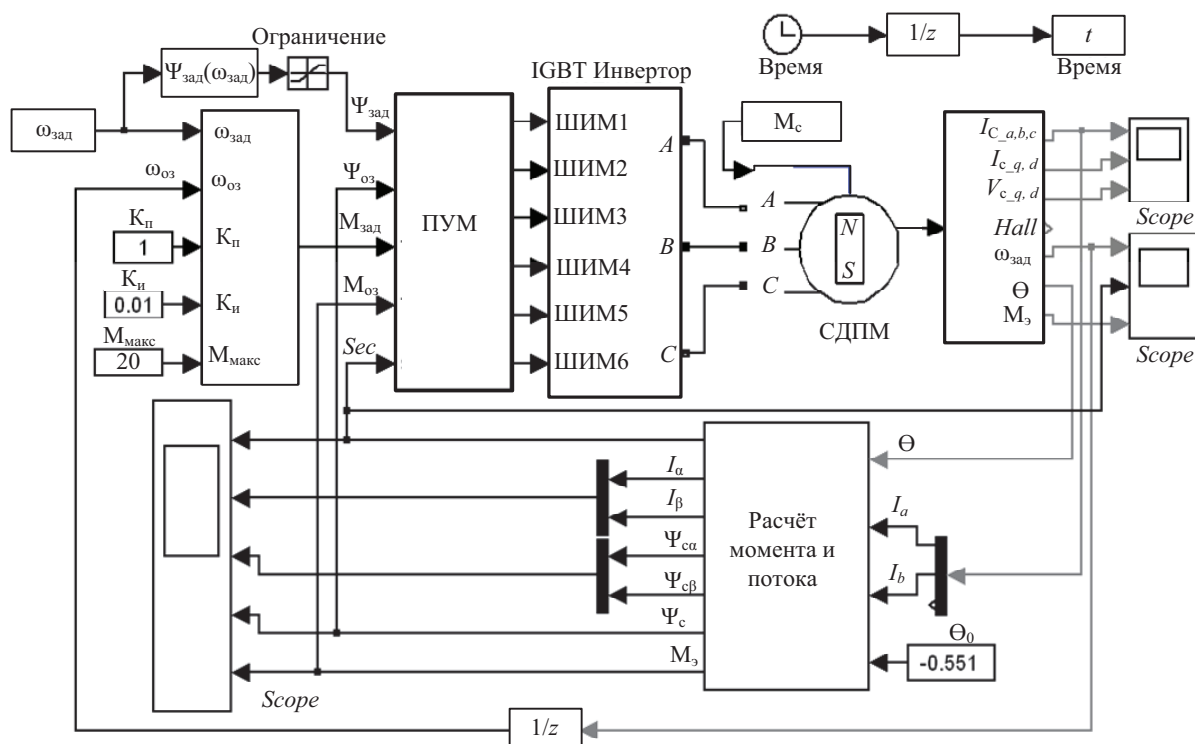


Рис. 2. Имитационная модель системы прямого управления моментом для электропривода на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами

### Сравнение характеристик

В данной части сравниваются статические и динамические характеристики при использовании ВУ и ПУМ, используя среду моделирования Simulink MatLab и ее стандартную библиотеку силовой техники SimPowerSystems.

Так как цель работы – сравнить принципы управления, в моделях используются одни и те же силовые компоненты. Очень важно осуществить сравнение статических и динамических характеристик в идентичных условиях (задание, нагрузка, возмущение и т. д.) и с одними и теми же параметрами конфигурации модели (шаг расчета, время моделирования). В данной работе сопоставляются преимущества и недостатки обеих систем управления, и предпочтительной системой будет та, которая обеспечит:

- качественные статические и динамические характеристики;
- большую устойчивость к возмущающим воздействиям;
- наименьшие потери энергии в инверторе (количество переключений силовых транзисторов) и двигателе (формирование первой гармоники тока);
- меньшие затраты вычислительных ресурсов.

### А. Сравнение на номинальной скорости

Проведем моделирование систем векторного управления и прямого управления моментом при пуске двигателя с нагрузкой – 8 Н·м на скорость – 200 рад/с. Перерегулирование по моменту в системе векторного управления составляет около 20 %, а в системе прямого управления моментом – отсутствует. Кроме того, система с ПУМ быстрее реагирует на изменение нагрузки, рис. 3.

Анализ графика скорости показал, что система ПУМ имеет лучшую динамику без перерегулирования, рывка, и время реакции на задание по управлению также меньше, чем в системе ВУ. Обеспечивается это за счет того, что магнитный поток достигает установившегося значения быстрее и без перерегулирования, в отличие от системы ВУ.

### Исследование реверса двигателя

Для сравнения двух принципов управления при реверсе, в модели исследуется пуск СДПМ в прямом направлении на максимальную скорость (+200 рад/с) с последующим заданием на отрицательную максимальную скорость (–200 рад/с). Анализ переходных характеристик момента при реверсе, рис. 4, показывает, что переходные процессы

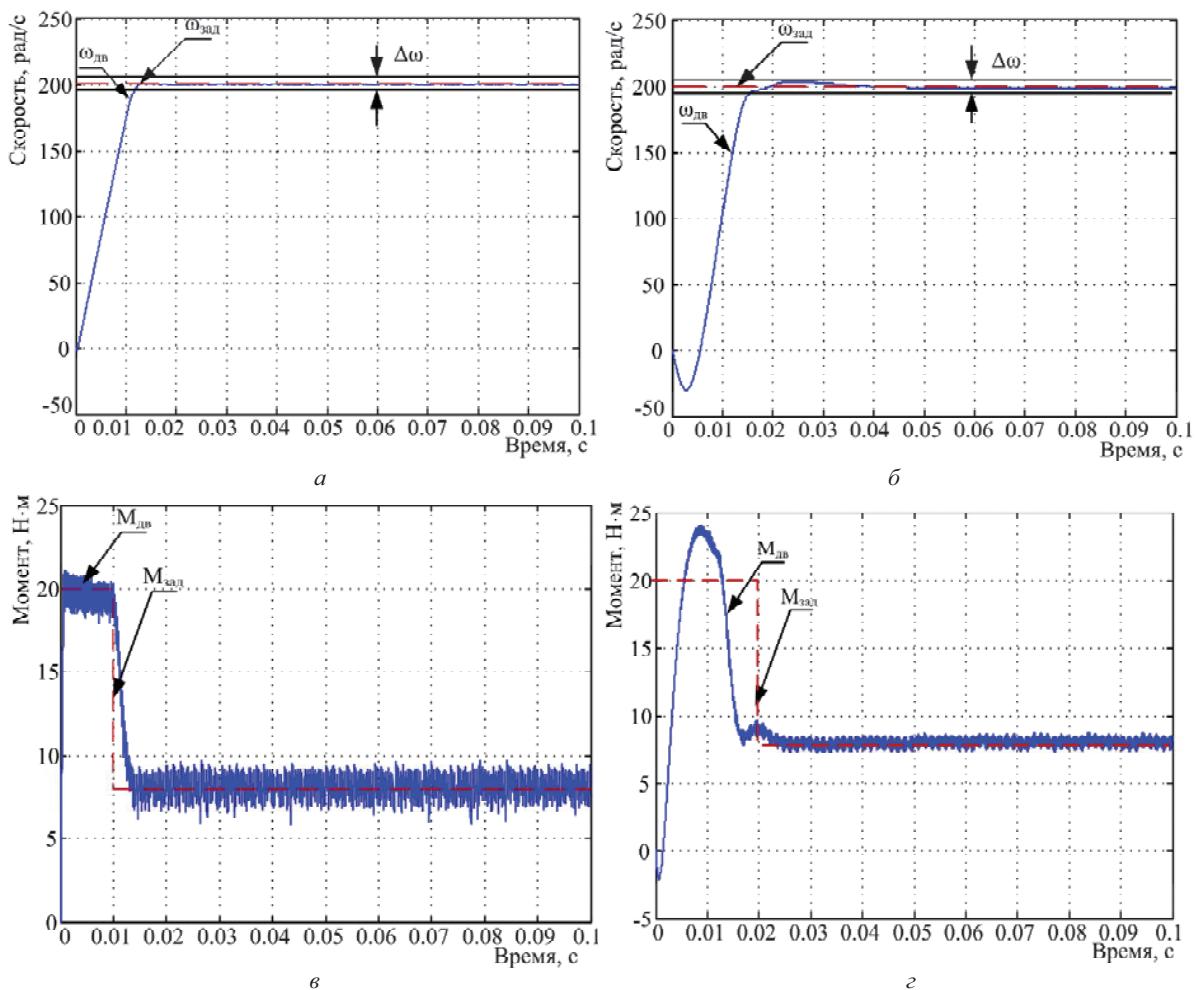


Рис. 3. Переходные процессы пуска под нагрузкой с прямым управлением момента (а, в) и векторным управлением (б, г)

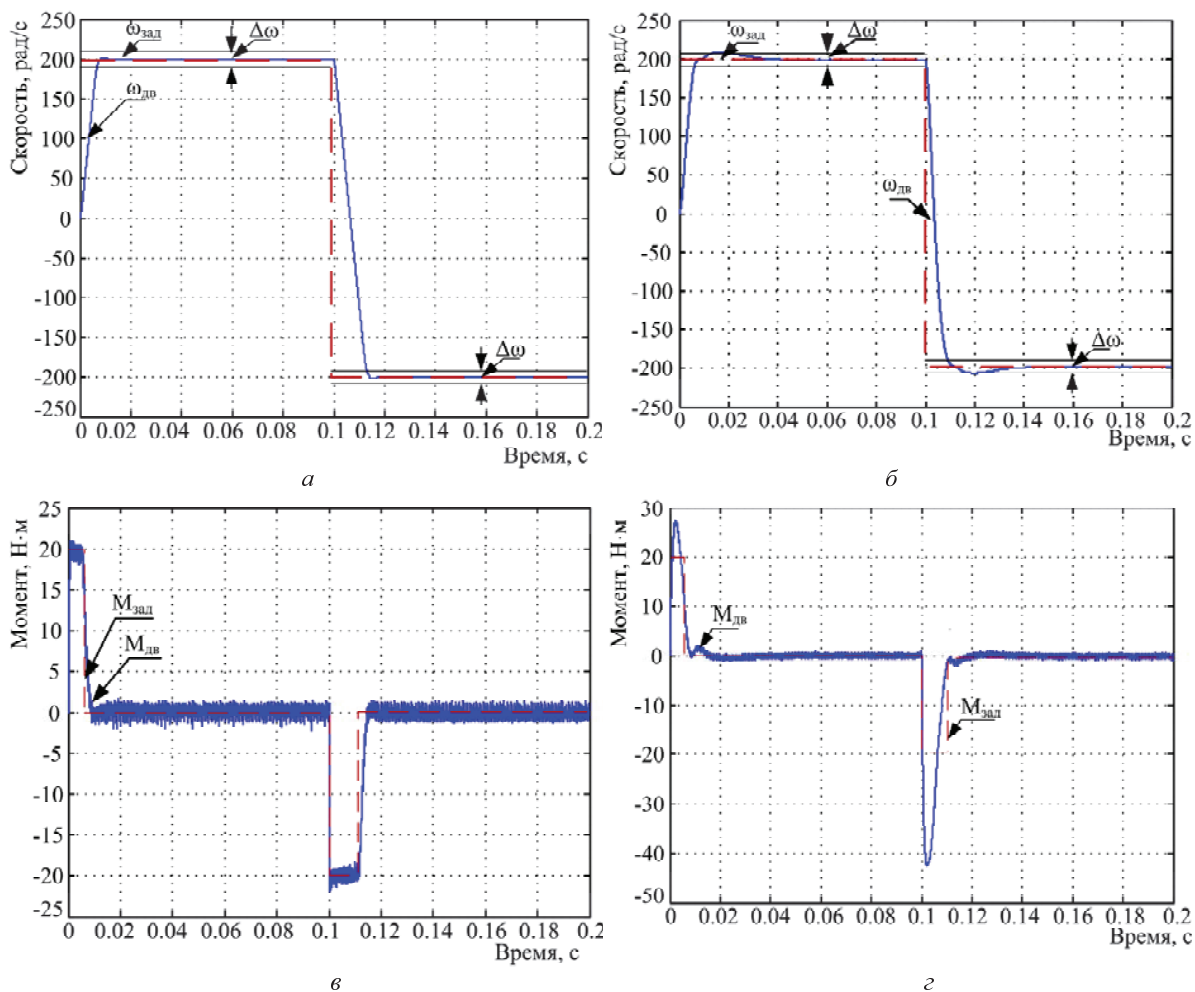


Рис. 4. Переходные процессы реверса с прямым управлением моментом (а, в) и векторным управлением (б, г)

протекают без перерегулирования и наиболее точно отражают характер изменения реактивной нагрузки в системах ПУМ. Значения момента в статическом режиме в системах ПУМ имеет больший уровень отклонения от среднего (большую дисперсию) вследствие значительно меньшей частоты коммутации вентиля инвертора (рис. 4, в, г).

Система векторного управления имеет преимущества по сравнению с прямым управлением моментом: затраты вычислительных ресурсов меньше и ниже амплитуда пульсаций при работе в статических режимах. Векторное управление уступает прямому управлению моментом из-за низкой устойчивости к изменению параметров и требует использования более сложной системы широтно-импульсной модуляции.

Анализ влияния частоты расчетов для ПУМ

Проведем исследование пуска системы с ПУМ для различных частот исполнения управляющего алгоритма. Как видно из рис. 5, для того, чтобы добиться такого же низкого уровня пульсаций момента (фактически – синусоидальности токов

статора) как при работе векторной системы на частоте 10 кГц (частота ШИМ также 10 кГц), необходимо обрабатывать алгоритм ПУМ в 5 раз чаще, что является пределом для современных микроконтроллеров серии Motor Control с тактовыми частотами порядка 100 МГц. В результате исследований выявлена следующая закономерность при работе системы с ПУМ: частота переключения транзисторов (в отличие от векторной системы с ШИМ) не является постоянной величиной. Она достигает максимума при работе на низких скоростях (порядка 25 кГц), падает при увеличении скорости вращения вала (до 20 кГц) и существенно уменьшается при увеличении нагрузки на высокой скорости вращения (до 12 кГц). При работе векторной системы управления частота переключений всегда остается постоянной, количество переключений в 6 раз больше, чем используемая частота ШИМ.

#### Выводы

Сравнительный анализ электроприводов с синхронным двигателем с постоянными магнитами с

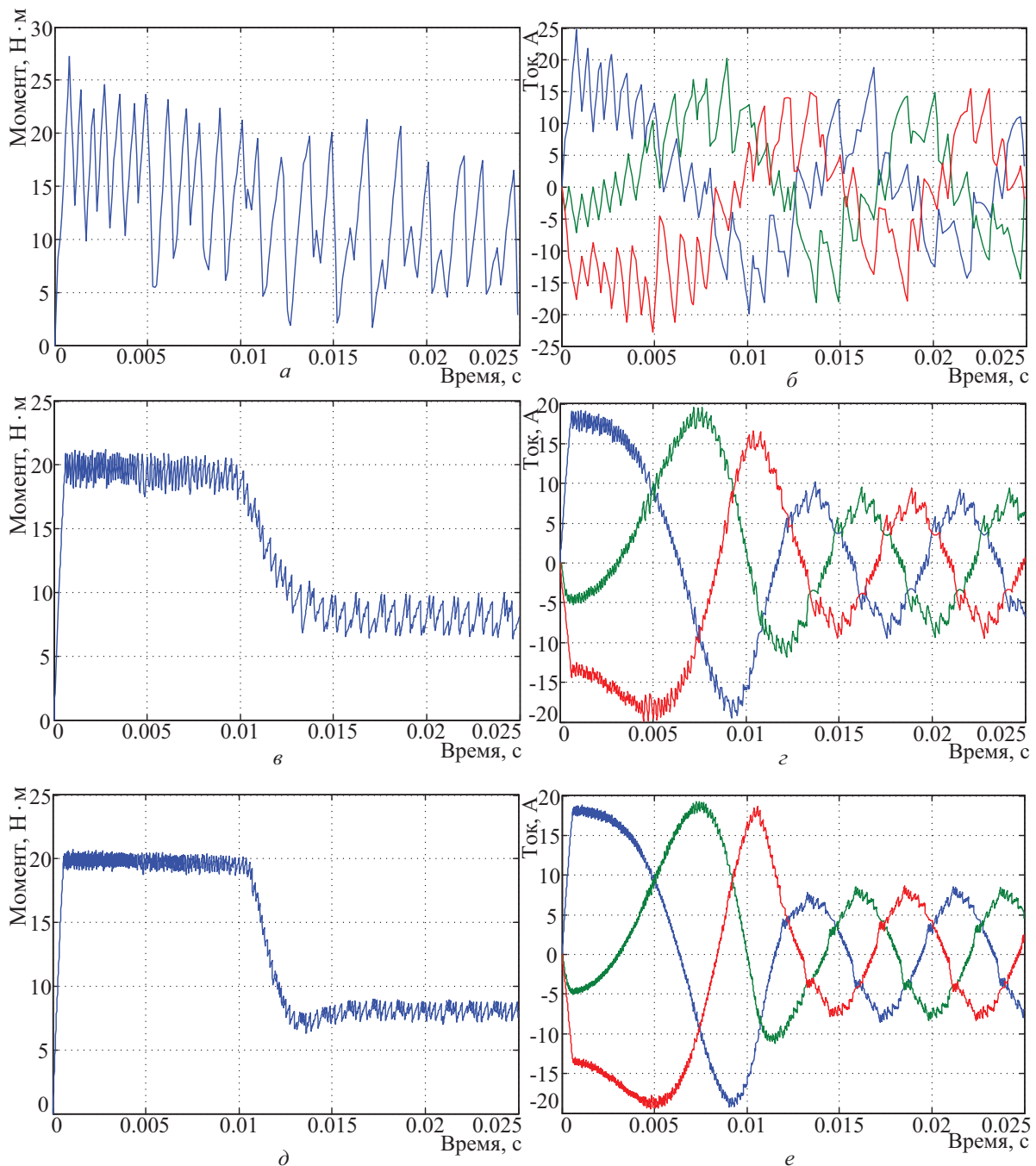


Рис. 5. Влияние частоты дискретизации на работу системы ПУМ: а, б – 10; в, г – 50; д, е – 100 кГц

векторной системой частотно-токового управления и системой прямого управления моментом показал, что обе системы управления востребованы при различных требованиях к регулируемому электроприводу со стороны технологического процесса или установки.

В динамических режимах система с прямым управлением моментом предпочтительнее, т. к. лучше обрабатывает управляющие и особенно возмущающие воздействия за счёт использования релейного регулятора момента. Однако в статических режимах работы большие пульсации момента ухуд-

шают показатели качества регулирования системы. Уменьшить пульсации момента в системе прямого управления моментом возможно путём увеличения тактовой частоты переключения вентилей инвертора, что в свою очередь ограничено ресурсами микропроцессора системы управления. Система векторного управления предпочтительна в электроприводах при малых возмущениях нагрузки и более стабильном управлении.

Системы с ПУМ предпочтительны для интегрированных решений систем управления, когда конструктивно сложно отвести тепло при нагреве

радиаторов силовых транзисторов. Системы векторного управления дают меньшие потери в двигателе за счет низкого уровня гармоник тока, отличных от первой, т. е. являются потенциально более энергоэффективными. Увеличение частот дискре-

тизации при расчетах алгоритма ПУМ (фактически, увеличение затрат на вычислительный ресурс системы управления) позволяет приблизиться к характеристикам, которыми обладают системы векторного управления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mademlis C., Agelidis V.G. On Considering Magnetic Saturation with Maximum Torque to Current Control in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives // IEEE Trans. Energy Conversion. – 2001. – V. 16. – № 3. – P. 246–252.
2. Shyu K.K., Lai C.K., Tsai Y.W., Yang D.I. A Newly Robust Controller Design for the Position Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor // IEEE Trans. Industrial Electronics. – 2002. – V. 49. – № 3. – P. 558–565.
3. Mohamed R. Direct Instantaneous Torque Control in Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Motors – a New Approach // IEEE Trans. Energy Conversion. – 2007. – V. 22. – № 4. – P. 829–838.
4. Rahman M., Zhong L., Haque M., Rahman A. A direct torque-controlled interior permanent-magnet synchronous motor drive without a speed sensor // IEEE Trans. Energy Conversion. – 2003. – V. 18. – № 1. – P. 17–22.
5. Hiren M., Pankit T., Hemangini V. Comparative study of field oriented control and direct torque control of induction motor // Journal of information knowledge and research in electrical engineering. – 2011. – V. 1. – № 2. – P. 44–50.
6. Zhong L., Rahman M., Hu W., Lim L. Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives // IEEE Trans. Power Electron. – 1997. – V. 12. – № 3. – P. 528–536.

Поступила 13.09.2011 г.

УДК 621.313.333

## ТРЕХПАЗОВАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТЕРЖНЯ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.А. Тюков, В.В. Пастухов, К.В. Корнеев

Новосибирский государственный технический университет  
E-mail: heart1981@mail.ru

*Представлена методология определения параметров ротора с помощью теории конечно-элементного анализа. Показано, что трехпазовая математическая модель короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя является достаточной для определения активных и индуктивных параметров ротора. Приведены результаты расчета параметров ротора, математического моделирования и опытного определения пусковых характеристик асинхронного двигателя.*

#### Ключевые слова:

Короткозамкнутый ротор, асинхронный двигатель, активные и индуктивные параметры ротора, метод конечно-элементного анализа, математическая модель, FEMM, MATLAB.

#### Key words:

Asynchronous motor, squirrel-cage rotor, active and inductive parameters of the rotor, finite elements method, mathematical model, FEMM, MATLAB.

История развития электротехники свидетельствует о наличии нескольких подходов к изучению электрических машин: на основе теории поля, теории цепей и комбинированного. В настоящее время комбинированный подход считается наиболее прогрессивным. Для расчета характеристик электрических машин с помощью такого подхода используется косвенная и прямая связь уравнений магнитного поля и электрических цепей. Прямая связь характеризуется совместным решением уравнений магнитного поля и электрических цепей и применяется при расчете статических режимов работы электрической машины. Рассмотрение динамических режимов работы с помощью данного подхода вызывает определенные трудности. В случае косвенной связи уравнений магнитного поля

и электрических цепей уравнения решаются последовательно. Такой подход используется как для расчета статических, так и динамических характеристик.

Целью данной работы является построение математической модели для определения активного сопротивления и индуктивности рассеяния стержня короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя с помощью численного расчета картины поля методами конечного элементного анализа, которые впоследствии могут быть использованы при расчете статических и динамических характеристик с применением косвенной связи уравнений поля и цепей.

Для определения активных и индуктивных параметров стержня ротора была использована мето-