

УДК 621.3.004.18

## Анализ алгоритмов управления асинхронным электроприводом с двухфазным корректором коэффициента мощности<sup>1</sup>

А.С. Ушков, А.Р. Колганов

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: taugrin@gmail.com, klgn@drive.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Повышение энергоэффективности асинхронного электропривода возможно при введении в его состав корректора коэффициента мощности. Наибольший эффект повышения коэффициента мощности и улучшения электромагнитной совместимости электропривода достигается при использовании многофазных корректоров коэффициента мощности. Алгоритмы управления электропривода с такими корректорами коэффициента мощности изучены недостаточно. В связи с этим актуальным является сравнительный анализ этих алгоритмов по критерию быстродействия.

**Материалы и методы:** Использованы методы натурального эксперимента. Алгоритмы управления проверены на микроконтроллере TMS320F28035 с использованием языков С и ассемблер, среда программирования – Code Composer Studio. Эксперименты проведены на преобразователе TMDSPFCMTRKIT фирмы Texas Instruments. Программа экспериментов заключалась в определении ресурсов, затраченных микроконтроллером при реализации каждого из алгоритмов, с помощью инструментов Code Composer Studio.

**Результаты:** Представлены варианты реализации алгоритмов управления с использованием сопроцессора CLA (Control Law Accelerator) и без него. Показано, что реализация системы управления с использованием сопроцессора CLA является наиболее энергоэффективной и позволяет достичь частоты контура тока порядка 100 кГц, для систем без сопроцессора – при значениях не более 50 кГц.

**Выводы:** Анализ вариантов показал, что система управления, реализованная на основе цифровых сигнальных микроконтроллеров с сопроцессором CLA, характеризуется наибольшим быстродействием и наилучшей энергоэффективностью. Полученные результаты могут найти применение при разработке современных электромехатронных модулей.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, корректор коэффициента мощности, микроконтроллер, система управления, сопроцессор, алгоритм управления электроприводом.

## Analysis of control algorithms of induction motor electric drive with a two-phase power factor corrector

A.S. Ushkov, A.R. Kolganov

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: taugrin@gmail.com, klgn@drive.ispu.ru

### Abstract

**Background:** The energy efficiency of the asynchronous electric drive can be improved by introducing a power factor corrector (PFC) as its constituent part. The greatest effect of increasing the power factor and improving the electromagnetic compatibility of the electric drive is achieved by using multiphase PFC. However, control algorithms of electric drives with such power factors are studied insufficiently. Therefore, a comparative analysis of these algorithms according to their performance criteria is required.

**Materials and methods:** The study employed methods of natural experiment. The control algorithms were tested on TMS320F28035 microcontroller using C and assembler programming languages, IDE Code Composer Studio. The experiments were carried out on the converter TMDSPFCMTRKIT produced by Texas Instruments. The experimental program consisted in determining the resources required for implementation of each algorithm by the microcontroller, using Code Composer Studio tools.

**Results:** The paper represents several variants of control algorithms implementation (with a CLA (Control Law Accelerator) coprocessor, and without it). It is shown that control systems using CLA coprocessor are the most energy efficient implementation allowing the achievement of about 100 kHz current circuit frequency, compared to less than 50 kHz in systems without a coprocessor.

**Conclusions:** The variations analysis has shown that the control system implemented on the basis of digital signal microcontrollers with a CLA coprocessor (Control Law Accelerator) has the highest performance and best energy efficiency. The results obtained can be applied to designing modern electro-mechatronic modules.

**Key words:** induction electric drive, power factor corrector, microcontroller, control system, coprocessor, electric drive control algorithm.

DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.047-052

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00972)

На современном этапе развития науки и техники системы электропривода прочно занимают лидирующее положение среди приводных устройств и обеспечивают бесперебойную и надежную работу технологических механизмов во многих отраслях промышленности и специальной техники.

В качестве приводного двигателя наибольшее распространение находит асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором.

Повсеместное применение АД обусловлено их высокой надежностью, сравнительно низкой стоимостью и приемлемыми эксплуатационными расходами. По экспертным оценкам, на предприятиях Российской Федерации используются от 120 до 150 млн единиц АД. До 70% АД сосредоточено в энергоемких отраслях: горно-, нефте-, газодобывающей, металлургической, строительной промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве.

В настоящее время повышение энергоэффективности работы оборудования выдвигается на первый план в развитии национальной экономики.

Современный асинхронный электропривод (АЭП) реализуется на базе силовой полупроводниковой техники с применением микропроцессорного управления. Подавляющее большинство современных асинхронных электроприводов реализованы на базе двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ), которые, как правило, выполнены по схеме «неуправляемый выпрямитель – ёмкостный фильтр – транзисторный автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения».

Наличие неуправляемого выпрямителя оказывает существенное влияние на первичную сеть. Это связано с тем, что кривая потребляемого тока значительно отличается по форме от кривой напряжения питающей сети переменного тока. Спектр потребляемого тока в данном случае помимо основной гармоники содержит «паразитные» высшие гармоники, обусловленные нелинейностью характеристик диодов выпрямителя и влиянием ёмкостного фильтра.

На данный момент существует ряд международных<sup>2</sup> и государственных стандартов<sup>3</sup>, нормирующих гармонический состав токов, потребляемых нелинейными потребителями.

Одним из наиболее простых и дешёвых способов улучшения гармонического состава потребляемого из сети тока, а также повышения энергосбережения является использование

корректоров коэффициента мощности (ККМ). Задачей ККМ в идеале является формирование синусоидального сетевого тока, синфазного напряжению сети. Силовая часть АЭП с наиболее распространенной топологией ККМ представлена на рис. 1.

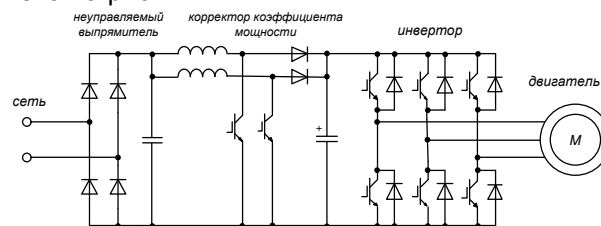


Рис. 1. Силовая схема асинхронного электропривода с двухфазным корректором коэффициента мощности

Применение ККМ в структуре АЭП накладывает следующие особенности на реализацию микропроцессорной системы управления (СУ).

Частота работы СУ ККМ обычно в несколько раз выше частоты СУ АЭП (если для АЭП это значение обычно составляет от 1 до 10 кГц, то для ККМ самое минимальное значение – 25 кГц). СУ АЭП обычно обрывается в прерывании от одного из модулей ШИМ. Намного более высокая частота работы СУ ККМ обязывает при микропроцессорной реализации уделять ей больший приоритет по сравнению с СУ АЭП (как один из вариантов – использование прерывания с более высоким приоритетом по сравнению с модулем ШИМ).

В настоящее время существует тенденция применения многофазности при построении ККМ. Преимущество многофазности состоит в уменьшении пульсаций тока сети, что увеличивает коэффициент мощности и улучшает электромагнитную совместимость преобразователя. Кроме того, многофазность позволяет улучшить массогабаритные показатели компонентов, применяемых в корректоре. К таким компонентам относятся вольтодобавочный индуктор, мощный полевой МОП-транзистор и силовой диод. Меньшие размеры этих компонентов позволяют получить более распределенную топологию печатной платы, что обеспечивает лучшее рассеяние тепла различными мощными компонентами и более низкий профиль систем питания. Кроме того, меньшие массогабаритные показатели компонентов обычно приводят и к экономической выгоде. Однако у многофазности есть и свои минусы – система управления для многофазного ККМ должна иметь в несколько раз большее быстродействие, чем для однофазного корректора.

Рассмотрим следующие возможные варианты микропроцессорной реализации СУ АЭП с ККМ.

Первый вариант: работа СУ АЭП и СУ ККМ осуществляется в одном прерывании микроконтроллера, чаще всего это прерывание от

<sup>2</sup> ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005). Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007.

<sup>3</sup> ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2006.

модуля ШИМ<sup>4</sup>. Прерывание осуществляется от модуля ШИМ, который управляет ключами ККМ.

Частоты работы СУ ККМ и СУ АЭП выбираются пропорциональными, а поскольку частота работы СУ АЭП гораздо ниже, то весь ее алгоритм разбивается на отдельные задачи и в каждом прерывании осуществляется обработка алгоритма СУ ККМ и одной задачи СУ АЭП. Временная диаграмма, объясняющая данный алгоритм, представлена на рис. 2.

Второй вариант реализации СУ заключается в использовании двух прерываний микроконтроллера с различными приоритетами<sup>4</sup>. Обработка СУ ККМ осуществляется в прерывании с более высоким приоритетом, а СУ АЭП – с более низким. Примером для этого варианта может быть следующее решение (применительно к микроконтроллерам семейства C28x фирмы Texas Instruments): СУ АЭП выполняется в прерывании от модуля ШИМ №0 (ePWM0\_INT), а СУ ККМ выполняется в прерывании от таймера №0 (TINT0), которое имеет более высокий приоритет. Временная диаграмма, объясняющая данный алгоритм, представлена на рис. 3.

Еще одним вариантом является использование многоядерных микроконтроллеров (например, семейство Concerto фирмы Texas Instruments), при этом обработка СУ АЭП и СУ ККМ происходит параллельно. Но многоядерные ЦСП стоят на порядок дороже, что, несомненно, приведет к удорожанию всего преобразователя.

Однако у фирмы Texas Instruments очень интересное и экономически выгодное решение этой проблемы. Речь идет о ЦСП семейства TMS320F2803x и TMS320F2806x. Эти ЦСП содержат в своем составе модуль CLA (Control Law Accelerator).

CLA – это независимый модуль для выполнения вычислений с числами, представленными в формате с плавающей точкой. Модуль CLA разработан специально для выполнения скоростных задач вне ядра (CPU) микроконтроллера. Этот модуль имеет непосредственный доступ к регистрам АЦП, компаратора, ШИМ, а также высокоточного ШИМ (HRPWM). Эти особенности позволяют реализовать СУ ККМ в этом модуле, в то время как СУ АЭП будет выполняться в CPU. Таким образом, обе системы управления будут работать параллельно<sup>5</sup>.

В данной реализации СУ АЭП с ККМ остается одно проблемное место, которое необходимо учитывать. Дело в том, что обе СУ работают

параллельно и обеим необходима информация с датчиков электрических величин – другими словами, информация с АЦП. Но поскольку в микроконтроллерах этого семейства только один АЦП, то могут возникнуть коллизии.

Одним из вариантов, который позволит избежать этих коллизий, является следующее решение. Частоты работы обеих СУ выбираются пропорциональными. Запуск АЦП происходит аппаратно от модуля ШИМ, который управляет ключами ККМ. При этом триггером для запуска АЦП обычно выбирается событие, когда счетчик модуля ШИМ равен периоду, т. е. в момент времени, максимально удаленный от коммутации транзисторных ключей инвертора и ККМ (для того, чтобы в измеренном сигнале было меньше шумов).

И самое главное, между модулем ШИМ ККМ и модулями ШИМ инвертора осуществляется сдвиг по фазе, который точно учитывает время преобразования АЦП. Временная диаграмма, объясняющая данный алгоритм, представлена на рис. 4.

## Заключение

Сравнительный анализ алгоритмов системы управления показал следующие результаты: максимальная частота работы СУ ККМ для первых двух вариантов оказалась не более 50 кГц, в то время как для системы управления, использующей модуль CLA микроконтроллера, удалось достичь частоты порядка 100 кГц. Таких значений удалось достичь благодаря тому, что СУ ККМ выполняется в сопроцессоре CLA, не затрагивая при этом СУ АЭП, которая выполняется в CPU. Таким образом, реализация СУ АЭП с ККМ на основе микроконтроллера с модулем CLA является наиболее быстродействующей. Кроме того, увеличение частоты работы СУ ККМ позволит точнее задавать форму тока, потребляемого из сети, что увеличит коэффициент мощности электропривода, а также его электромагнитную совместимость, поэтому этот алгоритм можно также назвать наиболее энергоэффективным.

<sup>4</sup> Implementing Sensorless Field Oriented Control of an AC Induction Motor with PFC front end on 2000 Microcontrollers/ Dallas: Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications, Jan. 2013.

<sup>5</sup> Implementing Sensorless Field Oriented Control of AC Induction Motor with PFC front end running on CLA using C2000 Microcontrollers (v1.0)/ Dallas: Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications, Oct. 2010.

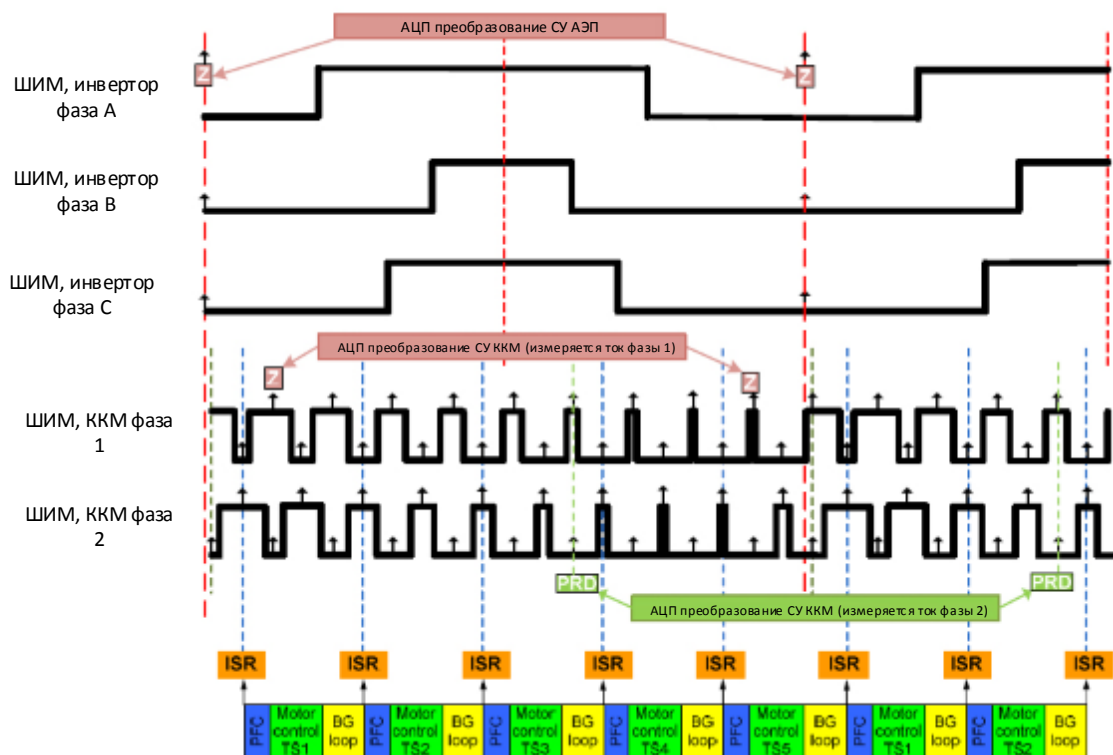


Рис. 2. Временная диаграмма, поясняющая алгоритм работы СУ АЭП с ККМ в одном прерывании микроконтроллера

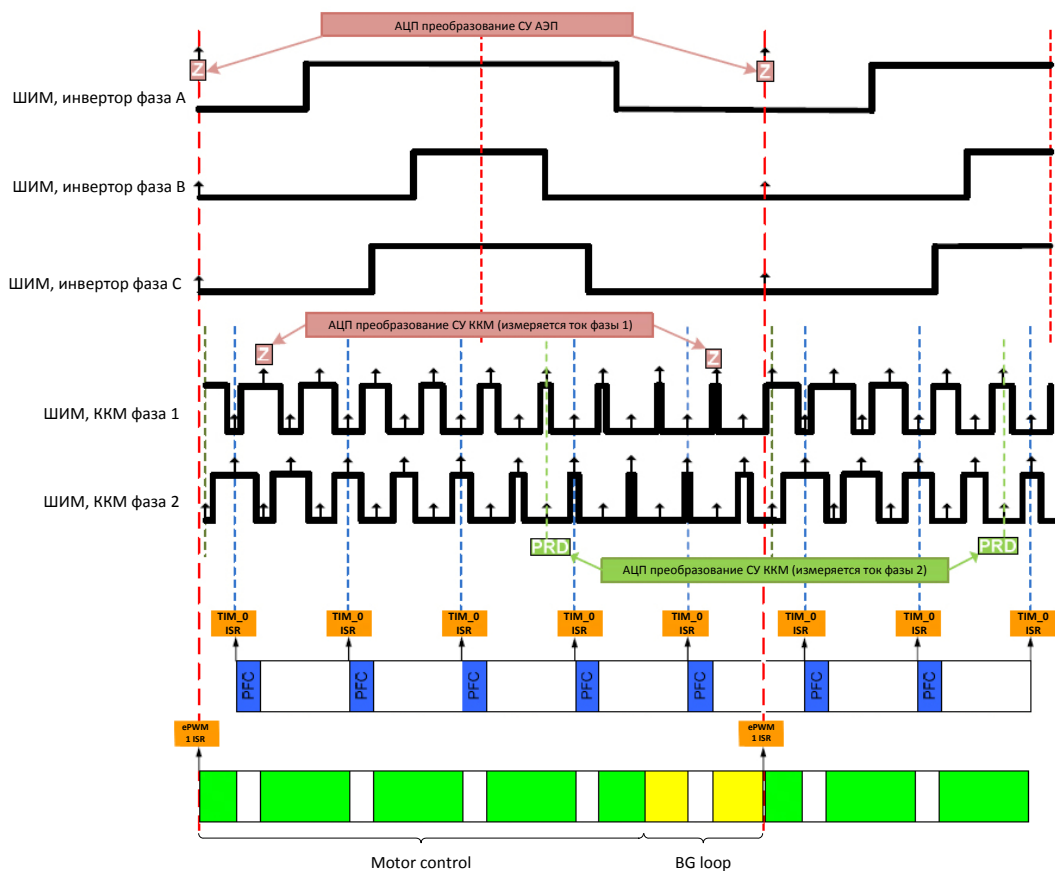


Рис. 3. Временная диаграмма, поясняющая алгоритм работы СУ АЭП с ККМ в двух прерываниях микроконтроллера с разными приоритетами

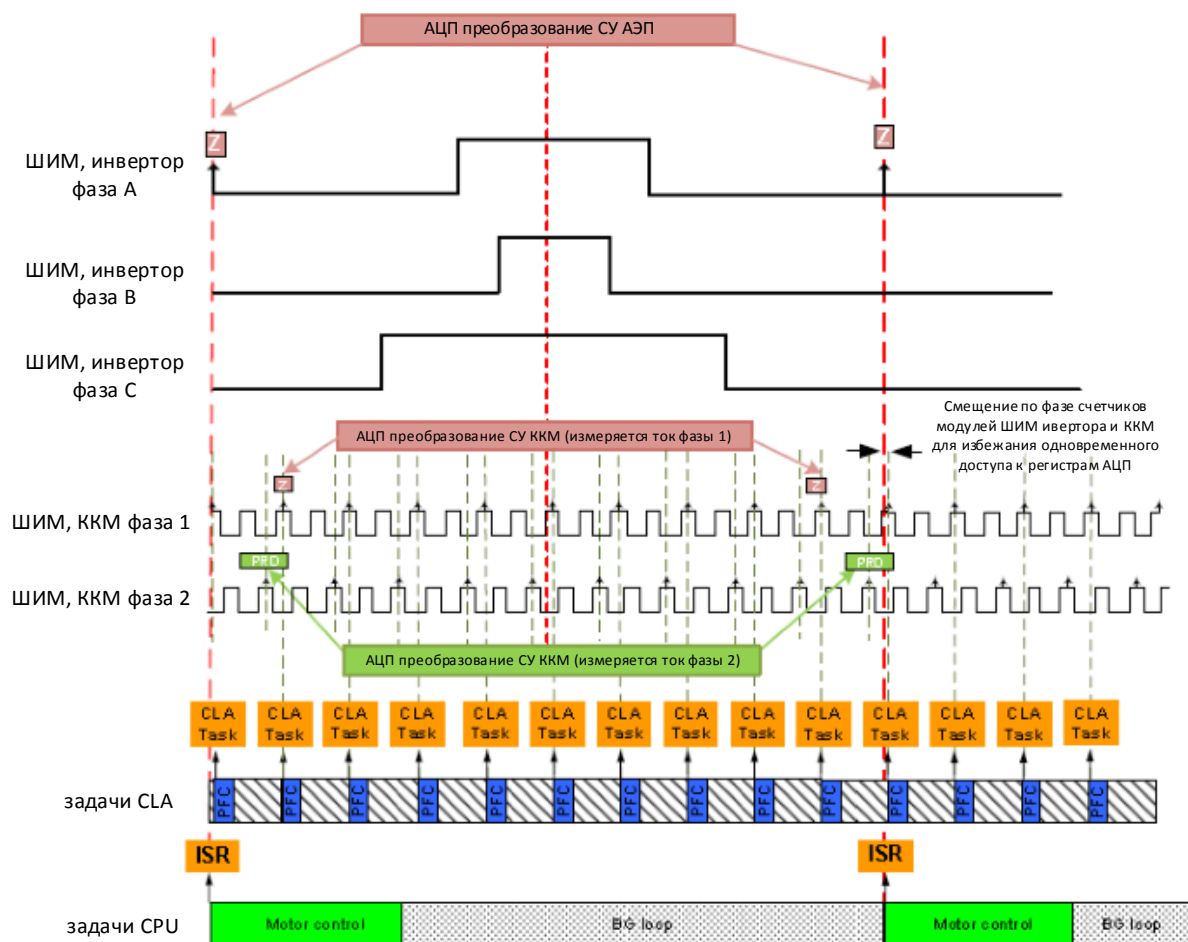


Рис. 4. Временная диаграмма, поясняющая алгоритм работы СУ АЭП с ККМ на базе микроконтроллера с модулем CLA

#### Список литературы

1. Козаченко В.Ф. Перспективная микропроцессорная элементная база и опыт разработки современных систем управления электроприводами и силовыми преобразователями энергии // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3, ч. 2. – С. 14–28.
2. Козаченко В.Ф. Новые возможности семейства специализированных микроконтроллеров TMS3202833x // Новости электроники. – 2008. – №14 (60).
3. Ice Charlie, Akin Bilal. Designing High-Performance and Power-Efficient Motor Control Systems // White paper, lit. num. SPRT528, Texas Instruments. – June 2009. – 10 p.
4. Староверов К.А. Разработка высококачественных устройств управления электроприводом на базе DSP Piccolo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.compel.ru/lib/ne/2009/13/4-razrabotka-vyisokokachestvennyih-ustroystv-upravleniya-elektroprivodom-na-baze-dsp-piccolo/>, свободный
5. Поляков В.Н., Шрейнер Р.Т. Энергоэффективные режимы регулируемых электроприводов переменного тока / под ред. Р.Т. Шрейнера; ФГАОУВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет». – Екатеринбург, 2012. 222 с.
6. Самодолов А. Новые двухъядерные микроконтроллеры для систем управления F28M35x семейства Concerto корпорации Texas Instruments // Компоненты и технологии. – 2011. – № 10–12.
7. Ушков А.С., Колганов А.Р. Анализ энергоэффективности асинхронного электропривода с корректором коэффициента мощности // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 74–79.

8. TI's Piccolo™ MCUs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/corp/docs/landing/f280xx-piccolo>, свободный.

#### References

1. Kozachenko, V.F. Perspektivnaya mikroprotsessornaya elementnaya baza i opyt razrabotki sovremennykh sistem upravleniya elektroprivodami i silovymi preobrazovatelyami energii [Prospective microprocessor element base and experience in developing modern control systems of electric drives and power converters] *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, issue 3, part 2, pp. 14–28.
2. Kozachenko, V.F. Novye vozmozhnosti semeystva spetsializirovannykh mikrokontrollerov TMS3202833x [Potential of TMS3202833x specialized microcontrollers]. *Novosti elektroniki*, 2008, no. 14(60).
3. Ice, Charlie, Akin, Bilal. Designing High-Performance and Power-Efficient Motor Control Systems. White paper, lit. num. SPRT528, Texas Instruments, June 2009, 10 p.
4. Staroverov, K.A. *Razrabotka vysokokachestvennykh ustroystv upravleniya elektroprivodom na baze DSP Piccolo* [Development of high quality electric drive control devices based on DSP Piccolo]. Available at: <http://www.compel.ru/lib/ne/2009/13/4-razrabotka-vyisokokachestvennyih-ustroystv-upravleniya-elektroprivodom-na-baze-dsp-piccolo/>, svobodnyj
5. Polyakov, V.N., Shreyner, R.T. *Energoeffektivnye rezhimy reguliruemyykh elektroprivodov peremennogo toka* [Energy efficient modes of AC electric drives]. Ekaterinburg, 2012. 222 p.
6. Samodelov, A. Novye dvukh'yadernye mikrokontrollery dlya sistem upravleniya F28M35x semeystva Concerto korporatsii Texas Instruments [New two-core Concerto family microcontrollers for F28M35x control systems produced by

Texas Instruments Corporation]. *Komponenty i tekhnologii*, 2011, no. 10–12.

7. Ushkov, A.S., Kolganov, A.R. Analiz energoeffektivnosti asinkhronnogo elektroprivoda s korrektorom koefitsienta moshchnosti [Analysis of energy efficiency of asynchronous elec-

tric drive with a power factor corrector]. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 6, pp. 74–79.

8. TI's Piccolo™ MCUs Available at: <http://www.ti.com/corp/docs/landing/f280xx-piccolo>, svobodnyj

*Ушков Александр Сергеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
ассистент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок,  
телефон (4932) 26-97-16,  
e-mail: [taugrin@gmail.com](mailto:taugrin@gmail.com)

*Колганов Алексей Руфимович,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок,  
телефон (4932) 26-97-09,  
e-mail: [klgn@drive.ispu.ru](mailto:klgn@drive.ispu.ru)