

УДК 621.3.004.18

## Анализ энергоэффективности асинхронного электропривода с корректором коэффициента мощности

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:** Обеспечение энергоэффективной работы технологического оборудования достигается путем использования энергосберегающих систем автоматизированного электропривода. Одним из малоизученных способов построения таких систем является асинхронный электропривод с корректором коэффициента мощности, исследование которого, несомненно, является актуальной задачей.

**Материалы и методы:** Для решения поставленной задачи использованы методы математического моделирования с применением многоуровневых структурных моделей элементов электропривода и постановкой вычислительных экспериментов в среде Simulink/MatLab.

**Результаты:** Рассматривается система управления корректором коэффициента мощности на основе boost-преобразователя. Предложены формулы и рекомендации по настройке регуляторов системы управления. Представлены модели частотно-регулируемого асинхронного электропривода с корректором коэффициента мощности.

**Выводы:** Вычислительные эксперименты с разработанными моделями показали, что использование корректора коэффициента мощности позволяет значительно повысить коэффициент мощности (до 0,95), улучшить гармонический состав и уменьшить более чем на 10 % потребление тока из сети. Включение в состав асинхронного электропривода корректора коэффициента мощности способствует повышению энергоэффективности технологического оборудования.

**Ключевые слова:** асинхронный электропривод, корректор коэффициента мощности, энергоэффективность.

## Energy efficiency analysis of induction motors with a 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 process equipment is achieved by using automatic electric drive energy conservation systems. One of the little-known ways to build such systems is induction motor electric drive with power factor correction (PFC), therefore, it is currently very important to study such drives.

**Materials and methods:** To solve this problem we used mathematical modeling techniques employing multi-level structural models of the electric drive components and conducted numerical experiments in the Simulink/MatLab environment.

**Results:** The paper discusses a power factor corrector converter-based control system. It also suggests formulas and recommendations for adjusting control system regulators. The paper represents models of variable-frequency induction motor drives with a power factor corrector.

**Conclusions:** The conducted computational experiments with the developed models have shown that the use of a power factor corrector can significantly increase the power factor (up to 0.95), improve the harmonic content and reduce the current consumption in the network by over 10%. Introduction of a power factor corrector into the induction motor electric drive increases the energy efficiency of process equipment.

**Key words:** induction motor electric drive, power factor correction, energy efficiency.

В качестве приводного двигателя наибольшее распространение в промышленности находит трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Повсеместное его применение обусловлено высокой надежностью, а также сравнительно низкой стоимостью.

Современный асинхронный электропривод 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 – емкостный фильтр – транзисторный инвертор напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения» (рис. 1).

Наличие неуправляемого выпрямителя сильно искажает форму потребляемого тока, что приводит к отрицательному влиянию преобразователей на сеть и на окружающую среду.

На данный момент существует ряд международных и государственных стандартов,

нормирующих гармонический состав токов<sup>1</sup>, потребляемых нелинейными потребителями. Одним из наиболее простых и дешевых способов улучшения гармонического состава потребляемого из сети тока, а также повышения энергоэффективности является применение корректоров коэффициента мощности (ККМ).

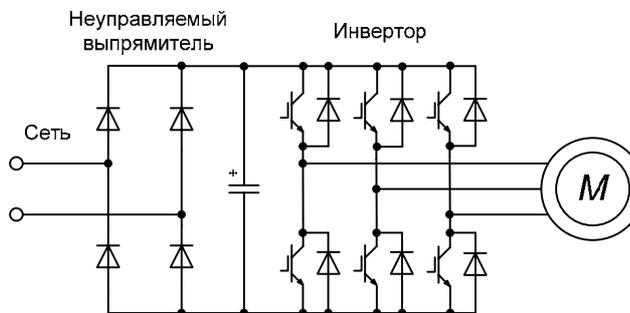


Рис. 1. Типовая схема двухзвенного ПЧ

Существует большое количество вариантов схемного исполнения ККМ, однако наиболее простым и экономичным является вариант реализации ККМ на базе повышающего преобразователя напряжения (boost-преобразователя). Структура асинхронного электропривода с таким ККМ представлена на рис. 2 [1].

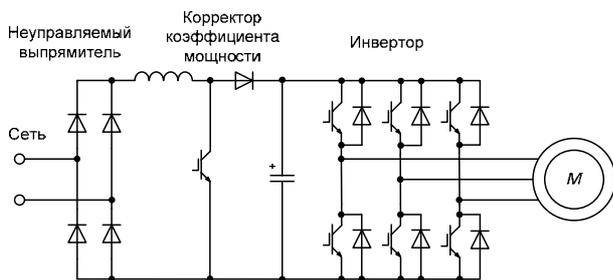


Рис. 2. Силовая схема асинхронного электропривода с корректором коэффициента мощности

Сам ККМ в данном случае располагается между неуправляемым выпрямителем и инвертором напряжения и состоит из индуктивности, транзистора, блокирующего диода, конденсатора и системы управления.

Структура системы управления корректором коэффициента мощности на основе boost-преобразователя представлена на рис. 3<sup>2</sup> [4, 5].

Система управления состоит из двух контуров: внутреннего контура тока и внешнего

контура напряжения. Система оперирует с относительными единицами, поэтому все входные параметры, такие как входное напряжение, ток дросселя и выходное напряжение, переведены в относительные единицы с помощью коэффициентов  $K_f$ ,  $K_s$  и  $K_d$ <sup>3</sup>.

На вход системы управления поступает задание напряжения  $V_{ref}$ , которое сравнивается с напряжением нагрузки, и их разница поступает на вход регулятора напряжения  $G_{vea}$ . Значение с выхода этого регулятора перемножается со значением выпрямленного напряжения сети, с обратным значением квадрата среднего значения напряжения сети ( $K_{avg}$ ), а также с коэффициентом  $K_m$ . Результирующее значение является заданием для контура тока, оно сравнивается со значением тока дросселя, а разница поступает на вход регулятора тока. Значение с выхода регулятора тока ограничено в пределах от 0 до 1 и подается на вход ШИМ-модулятора (PWM\_mod). Таким образом, значение с выхода регулятора тока определяет скважность переключения транзистора.

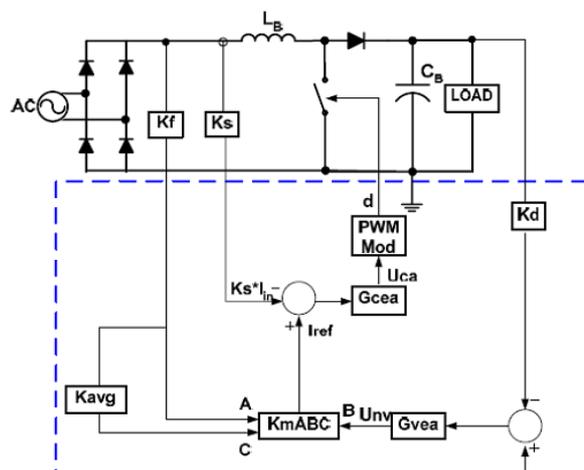


Рис. 3. Структура системы управления ККМ: AC – однофазный источник переменного напряжения;  $L_b$  – дроссель;  $C_b$  – электролитический конденсатор

Для исследования актуальности применения ККМ в асинхронном электроприводе в пакете расширения Simulink среды инженерных расчетов Matlab было создано две модели [3].

В первой модели представлен частотно-регулируемый асинхронный электропривод, работающий в скалярном режиме, без ККМ (рис. 4).

Силовая часть модели выполнена с использованием элементов библиотеки Power System, а управляющая часть – с помощью математических функциональных блоков библиотеки Simulink.

<sup>1</sup> ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2006; 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>2</sup> High Voltage Motor Control and PFC Kit Hardware Reference Guide (SPRUGU7). – Dallas: Texas Instruments, March 2010.

<sup>3</sup> Average Current Mode Controlled Power Factor Correction Converter using TMS320LF2407A (SPRA902A). – Dallas: Texas Instruments, Jul. 2005.

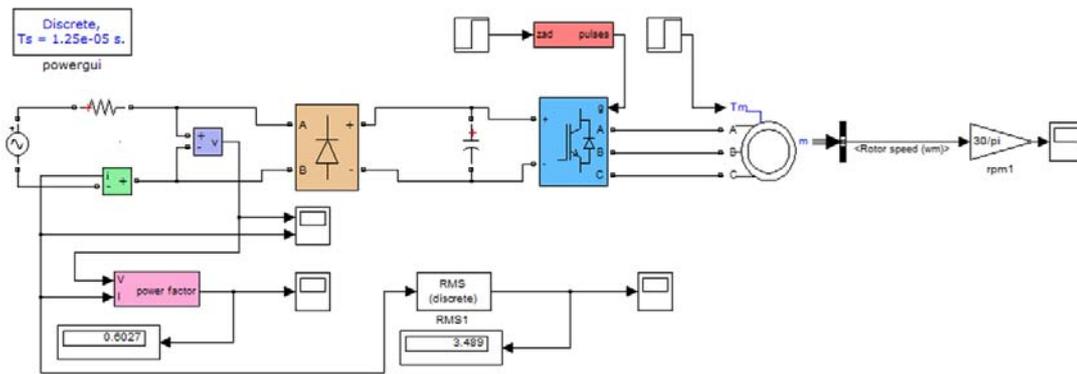


Рис. 4. Математическая модель асинхронного электропривода без ККМ

Питающая сеть представлена блоком AC Voltage Source (220 В, 50 Гц), неуправляемый выпрямитель – блоком Universal Bridge (однофазный мостовой выпрямитель), конденсатор (2 мФ), транзисторный инвертор – блоком Universal Bridge (трехфазный транзисторный инвертор), асинхронный электродвигатель – блоком Asynchronous Machine.

Мощность двигателя 0,25 кВт. Блок расчета коэффициента мощности вычисляет значение коэффициента мощности в ходе эксперимента, его внутренняя структура представлена на рис. 5.

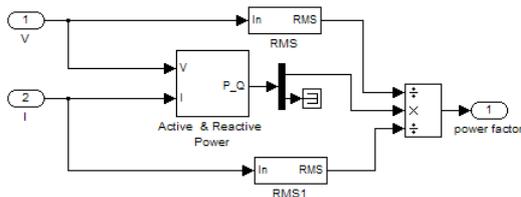


Рис. 5. Блок расчета коэффициента мощности

Асинхронный электропривод работает в скалярном режиме со стандартным законом управления  $U/f = \text{const}$ .

Блок расчета коэффициента мощности показал PF = 0,6. Среднее значение потребленного из сети тока составило 3,5 А.

Результаты моделирования представлены на рис. 6 и 7, на рис. 8 показан результат проведенного гармонического анализа потребляемого из сети тока.

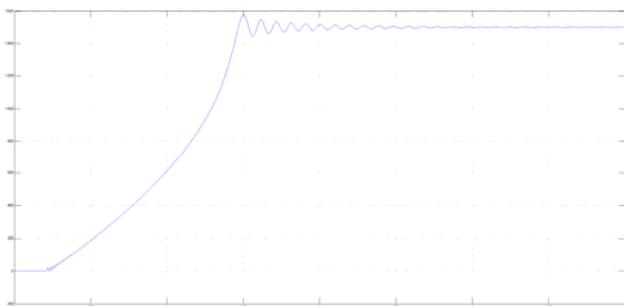


Рис. 6. Переходный процесс по скорости

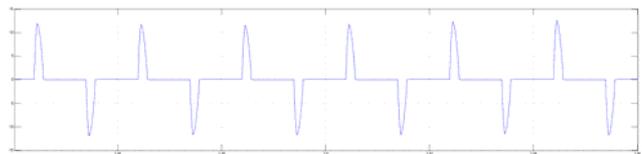


Рис. 7. Форма потребляемого из сети тока (в статике)

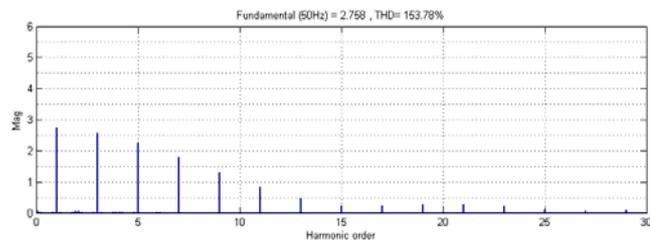


Рис. 8. Гармонический анализ потребляемого из сети тока

Во второй модели представлен скалярный асинхронный электропривод с ККМ (рис. 8).

Исходные данные для расчета системы управления следующие: мощность  $P = 400$  Вт; частота переменного тока сети  $f = 40\text{--}65$  Гц; минимальное входное напряжение  $V_{in\_min} = 100$  В; максимальное входное напряжение  $V_{in\_max} = 410$  В; минимальное выходное напряжение  $V_{out\_min} = 100$  В; максимальное выходное напряжение  $V_{out\_max} = 410$  В; напряжение на выходе  $V_{out} = 380$  В; емкость конденсатора  $C = 1$  мФ; индуктивность дросселя  $L = 1,2$  мГн; частота работы микропроцессорной системы управления  $f_s = 80$  кГц; частота коммутации дросселя  $f_{sw} = 80$  кГц; частота работы регулятора контура тока  $f_{ci} = 80$  кГц; частота работы регулятора контура напряжения  $f_{cv} = 200$  кГц.

Максимальный ток дросселя рассчитывается по формуле [2]

$$I_{max} = \frac{2P}{V_{in\_min}} = \frac{2 \cdot 400}{100} = 8 \text{ А.} \quad (1)$$

Коэффициенты  $K_f$ ,  $K_d$ ,  $K_f$  и  $K_m$  рассчитываются следующим образом [6]:

$$K_f = \frac{1}{V_{in\_max}} = \frac{1}{410} = 2,439 \cdot 10^{-3}; \quad (2)$$

$$K_d = \frac{1}{V_{out\_max}} = \frac{1}{410} = 2,439 \cdot 10^{-3}; \quad (3)$$

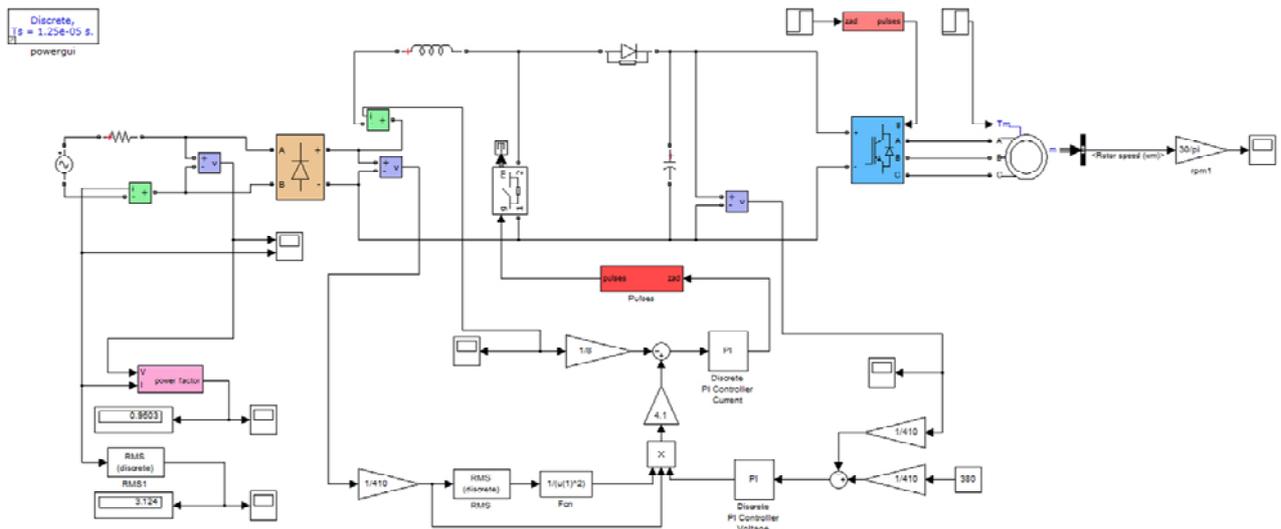


Рис. 9. Математическая модель асинхронного электропривода с ККМ

$$K_s = \frac{1}{I_{max}} = \frac{1}{8} = 0,125. \quad (4)$$

При расчете параметров ПИ-регулятора контура тока примем частоту среза регулятора тока  $f_{zero\_i} = 800$  Гц, тогда параметры будут рассчитываться следующим образом:

$$K_{pi} = \frac{2\pi f_{ci} L}{K_s V_{out\_max}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 80 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{0,125 \cdot 410} = 11,769; \quad (5)$$

$$T_{ci} = \frac{1}{2\pi f_{zero\_i}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 800} = 1,989 \cdot 10^{-4}; \quad (6)$$

$$K_{ii} = \frac{K_{pi} / T_{ci}}{f_s} = \frac{11,769 / 1,989 \cdot 10^{-4}}{80 \cdot 10^3} = 0,739. \quad (7)$$

При расчете параметров ПИ-регулятора контура напряжения примем частоту среза регулятора напряжения  $f_{zero\_v} = 10$  Гц, тогда параметры будут рассчитываться следующим образом:

$$Z_{load} = \frac{V_{out}^2}{P} = \frac{380^2}{400} = 361 \text{ Ом}; \quad (8)$$

$$K_{pv} = \frac{2K_f K_s}{K_d K_m} \left( \frac{V_{in\_max}}{V_{in\_min}} \right)^2 \frac{V_{out}}{Z_{load}} = \frac{2 \cdot 2,439 \cdot 10^{-3} \cdot 0,125}{2,439 \cdot 10^{-3} \cdot 4,1} \cdot \left( \frac{410}{100} \right)^2 \cdot \frac{380}{361} = 1,079; \quad (9)$$

$$T_{cv} = \frac{1}{2\pi f_{zero\_v}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 10} = 0,016; \quad (10)$$

$$K_{iv} = \frac{K_{pv} / T_{cv}}{f_s} = \frac{1,079 / 0,016}{80 \cdot 10^3} = 0,00085. \quad (11)$$

Блок расчета коэффициента мощности показал PF = 0,95. Среднее значение потребленного из сети тока составило 3,1 А.

Результаты моделирования представлены на рис. 10 и 11, на рис. 12 показан результат проведенного гармонического анализа потребляемого из сети тока.

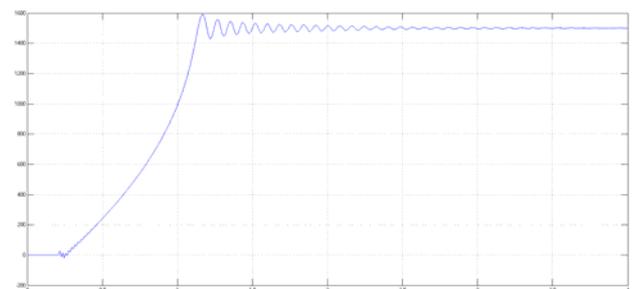


Рис. 10. Переходный процесс по скорости

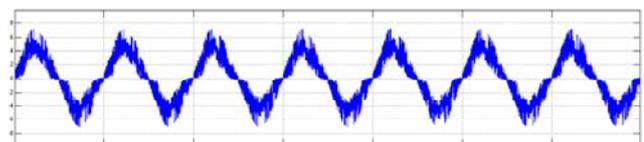


Рис. 11. Форма потребляемого из сети тока (в статике)

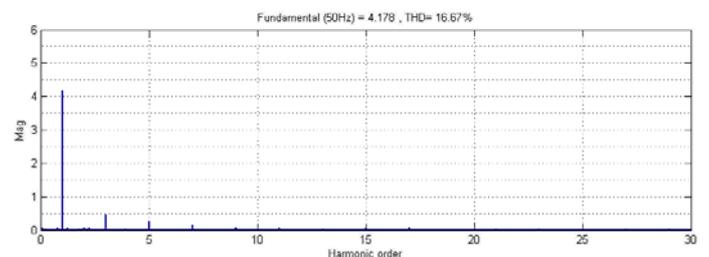


Рис. 12. Гармонический анализ потребляемого из сети тока

### Заключение

Модель электропривода с ККМ имеет следующие преимущества, по сравнению с моделью без ККМ: более высокий коэффициент мощности (0,95 против 0,6); лучший гармонический состав потребляемого из сети тока (в мо-

дели с ККМ форма тока более приближена к синусоиде); более высокая энергоэффективность (модель без ККМ в статике потребляет из сети 3,5 А, а модель с ККМ только 3,1 А).

Таким образом, проведенное математическое моделирование показало целесообразность применения ККМ в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах.

#### Список литературы

1. **Muhammad H. Rashid.** Power Electronics Handbook // Academic Press. – 2006. – ISBN 0120884798.
2. **Миддлбрук Р.Д.** Малосигнальное моделирование ключевых преобразователей мощности с широтно-импульсным регулированием // ТИИЭР. – 1988. – Т. 76, № 4. – С. 46–59.
3. **Амелина М.А.** Моделирование ИИВЭП (SMPS). Лекции для магистрантов по курсу «Современные методы анализа и моделирования электронных устройств» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://docs.google.com/file/d/0B\\_zuGjoSjDggMU9jMnBqR0JfTIU/edit](https://docs.google.com/file/d/0B_zuGjoSjDggMU9jMnBqR0JfTIU/edit), свободный.
4. **Герман-Галкин С.Г.** Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab 6.0: учеб. пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
5. **Семенов Б.Ю.** Силовая электроника: от простого к сложному. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с. (Сер. «Библиотека инженера»)
6. **Sun J.** New leading/trailing edge modulation strategies for two stage PFC AC/DC adapters to reduce DC-link capacitor

// Dissertation for master of science degree. – Texas A&M University, 2007.

#### References

1. Muhammad, H. Rashid. Power Electronics Handbook. Academic Press, 2006. ISBN: 0120884798.
2. Middlbruk, R.D. Malosignal'noe modelirovanie klyuchevykh preobrazovateley moshchnosti s shirotno-impul'snym regulirovaniem [Small signal modeling of key power converters with PWM regulation]. *TIIEP*, 1988, t. 76, no. 4, pp. 46–59.
3. Amelina, M.A. *Lektsii dlya magistrantov po kurcu «Sovremennye metody analiza i modelirovaniya elektronnykh ustroystv»* [Modeling IIVEP (SMPS). Lectures to undergraduates kurcu «Modern methods of analysis and modeling of electronic devices»]. Available at: [https://docs.google.com/file/d/0B\\_zuGjoSjDggMU9jMnBqR0JfTIU/edit](https://docs.google.com/file/d/0B_zuGjoSjDggMU9jMnBqR0JfTIU/edit)
4. German-Galkin, S.G. *Komp'yuternoe modelirovaniya poluprovodnikovyykh sistem v Matlab 6.0* [Computer modeling of semiconductor systems in Matlab 6.0]. Saint-Petersburg, KORONA print, 2001. 320 p.
5. Semenov, B.Yu. *Silovaya elektronika: ot prostogo k slozhnomu* [Power electronics: from simple to complex]. Moscow, SOLON-Press, 2005. 416 p.
6. Sun, J. New leading/trailing edge modulation strategies for two stage PFC AC/DC adapters to reduce DC-link capacitor. Dissertation for master of science degree. Texas A&M University, 2007.

*Ушков Александр Сергеевич,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант 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)