

Силовой электронный регулятор напряжения асинхронного генератора ветроэнергетических установок

ЕЛЬ АЛАМИ А., КИСЕЛЕВ М.Г.

Рассматривается устройство запуска и регулирования уровня напряжения асинхронного генератора в составе ветроэнергетической установки при изменении активной и реактивной мощности нагрузки. Пуск и регулирование осуществляются с помощью силового электронного регулятора реактивной мощности обоих знаков. Регулятор реактивной мощности выполнен на основе преобразователя AC/DC с полностью управляемыми ключами и электролитическим конденсатором на стороне постоянного тока преобразователя, управляется методами широтно-импульсной модуляции. Приведены структурная схема системы управления и принцип синхронизации выходного напряжения генератора, а также результаты компьютерного моделирования при пуске генератора и изменении нагрузки.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, асинхронный генератор, пуск генератора, компенсация реактивной мощности, силовой электронный преобразователь, управление методами импульсной модуляции

В электроэнергетике интенсивно развиваются технологии по использованию возобновляемых источников энергии. Внедрение таких технологий связано с большими экономическими затратами и длительными сроками окупаемости. В ветроэнергетике для автономных систем мощностью от 10 до 100 кВт может эффективно использоваться асинхронный генератор (АСГ) индукционного типа. Это сравнительно не дорогая электрическая машина отличается надёжностью и малыми затратами на обслуживание. Однако для создания вращающего электромагнитного момента (при возбуждении асинхронной машины в режиме генератора) следует параллельно генератору подключать конденсаторы или другой источник реактивной мощности ёмкостного характера. Значение ёмкостной мощности должно превышать индуктивную мощность нагрузки и обеспечивать требуемые значения выходного напряжения и частоты вращения магнитного поля статора [1]. При изменении режимов работы АСГ, в частности в случае изменения нагрузки, необходимо управлять реактивной мощностью на шинах генератора. В [2, 3] рассмотрены в общем виде различные способы реализации этого принципа управления.

Развитие силовой электроники позволяет совершенствовать эти способы на новой элементной базе, в частности на полностью управляемых электронных ключах [4]. В статье рассматривается принцип действия такого управляющего устройства, приводятся его структурная функциональная схема и алгоритм управления при регулировании реактивной мощностью.

Структура и подключение силового регулятора. На рис. 1 представлена функциональная схема подключения ветроэнергетической установки к нагрузке

ке. Для запуска асинхронной машины в режиме генератора и управления выходным напряжением АСГ в различных режимах работы необходимо регулировать реактивную мощность на его выходных шинах. Создание полностью управляемых полупроводниковых ключей позволило использовать трёхфазный мостовой преобразователь и в выпрямительном и в инверторном режимах без изменения схемы. Такие преобразователи в соответствии со стандартами МЭК принято обозначать как AC/DC (преобразователи переменного тока в постоянный ток и наоборот).

Преобразователь с источником напряжения на стороне постоянного тока в соответствии с заданным алгоритмом переключения ключей способен генерировать напряжение различной формы [5]. Реактивная мощность не является активной, поэтому на стороне постоянного тока преобразователя достаточно установить конденсаторную батарею. Преобразователь совместно с дросселями на стороне переменного тока образует регулируемый источник тока в соответствии с соотношением:

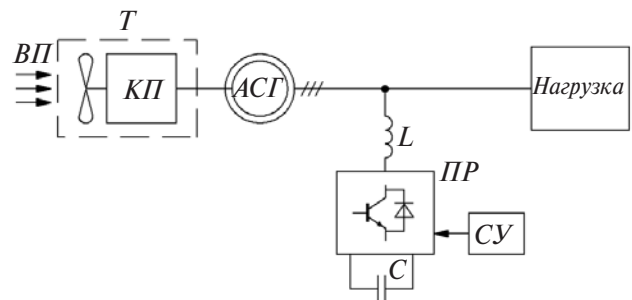


Рис. 1. Структурная схема подключения ветроэнергетической установки к нагрузке (ВП – воздушный поток; Т – турбина; КП – коробка передач; ПП – преобразователь; СУ – система управления; С – конденсатор; L – дроссель)

$$i_{\text{рег}}(t) = \frac{u_{\text{пр}}(t) - u_s(t)}{\omega L}, \quad (1)$$

где $u_{\text{пр}}(t)$ – выходное напряжение преобразователя; $u_s(t)$ – напряжение сети. Управление реактивной мощностью, необходимой для запуска АСГ и его работы в установившемся режиме, осуществляется формированием реактивных токов на выходе преобразователя.

Алгоритм регулирования частоты выходного напряжения АСГ. Основным входным сигналом системы управления регулятора, по которому производится регулирование, является сигнал с датчиков напряжения в точке подключения регулятора. В реализации алгоритма системы управления (СУ) силового регулятора можно выделить два основных функциональных блока (рис. 2). Задача первого – вычисление напряжения задания [6, 7], которое должен создавать преобразователь для получения требуемого значения реактивного тока, задача второго (блок ШИМ) – управление переключением ключевых элементов преобразователя.

Фазовая автоподстройка частоты (блок ФАПЧ) силовым регулятором реализуется с помощью преобразования трехфазной стационарной системы координат (abc) в двухфазную вращающуюся систему dq -координат с синхронизацией на частоте сети [6, 7]:

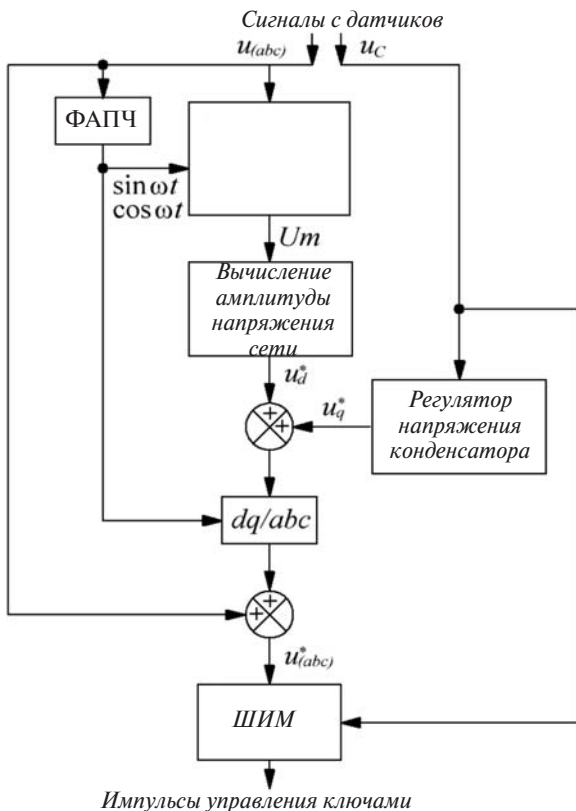


Рис. 2. Обобщенная структурная схема алгоритма работы системы управления

$$\begin{pmatrix} s_d \\ s_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2p/3) & \sin(\omega t + 2p/3) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 2p/3) & \cos(\omega t + 2p/3) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где s_a, s_b, s_c – мгновенные значения сигналов; s_d, s_q – проекции обобщенного вектора тока (напряжения) на соответствующие оси синхронной системы координат; ωt – круговая частота системы координат (синхронизирующих сигналов $\sin \omega t, \cos \omega t$).

Блок-схема алгоритма синхронизации приведена на рис. 3. В соответствии с (1) рассчитывается q -составляющая обобщенного вектора напряжений сети, которая подается на вход пропорционально-интегрального звена (ПИ-регулятор). В качестве синхронизирующих сигналов при abc/dq -преобразовании используются единичные гармонические сигналы $\sin(\omega t + j)$ и $\cos(\omega t + j)$ с текущими частотой и фазой напряжения сети. Начальная фаза и частота синхронизируемых сигналов вычисляются с помощью ПИ-регулятора, т.е. синхронизация выполняется как система автоматического регулирования с обратной связью по фазе и частоте синхронизируемых сигналов. В результате работы ПИ-регулятора начальная фаза и частота синхронизируемых сигналов становятся равными начальной фазе и частоте напряжения u_a , а q -составляющая вектора фазных напряжений сети становится равной нулю, что соответствует параллельному расположению оси d и вектора фазных напряжений.

На выходе блока синхронизации формируются единичные гармонические сигналы, причем сигнал $\sin(\omega t + j)$ синхронизирован с сигналом фазного напряжения u_a . Кроме синхронизации по фазе и частоте напряжению сети, блок синхронизации совмещает вычисление амплитуды напряжения сети U_m с помощью выходных сигналов U_d, U_q блока abc/dq :

$$U_m = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}. \quad (3)$$

На рис. 4 приведена структурная схема алгоритма вычисления сигнала задания напряжения u_d^* с целью регулирования напряжения генератора. Разница между номинальным значением амплитуды напряжения, равным 310 В, и текущим значением амплитуды выходного напряжения генератора поступает на ПИ-регулятор, который вычисляет значение величины, соответствующей отношению $-X_{L\text{рег}}/X_C$ или $+X_{L\text{рег}}/X_L$ в зависимости от знака ошибки на входе ПИ-регулятора. В этих отношениях $X_{L\text{рег}} = \omega L_{\text{рег}}$ соответствует индуктивному сопротивлению выходных дросселей регулятора, X_C и X_L – реактивному сопротивлению для

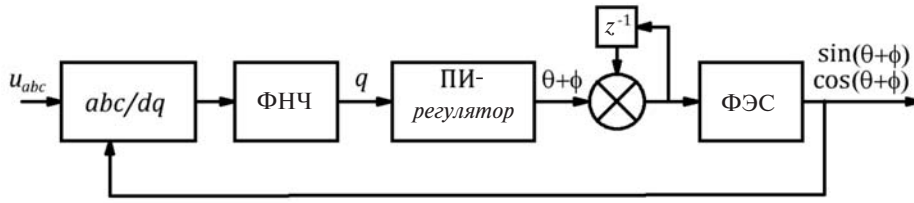


Рис. 3. Блок-схема алгоритма синхронизации: ФНЧ – фильтр низкой частоты; ФЭС – формирователь эталонных сигналов

регулирования напряжения сети. Для получения напряжения задания u_d^* выходной сигнал ПИ-регулятора умножается на текущее значение амплитуды напряжения сети.

При работе силового регулятора требуется на входных конденсаторах преобразователя поддерживать постоянный уровень напряжения с минимальными пульсациями. Номинальный уровень напряжения должен быть в два раза выше максимального значения амплитуды основной гармоники на-

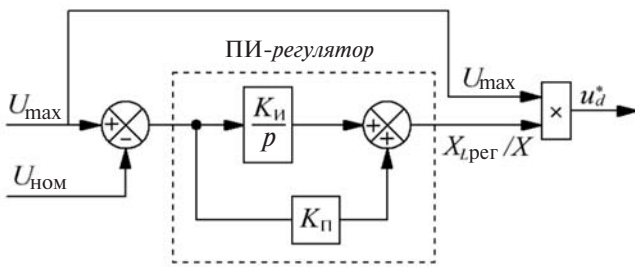


Рис. 4. Структурная схемы алгоритма вычисления сигналов задания напряжения регулятора: $K_{И}$, $K_{П}$ – коэффициенты интегрирующего звена и коэффициент усиления

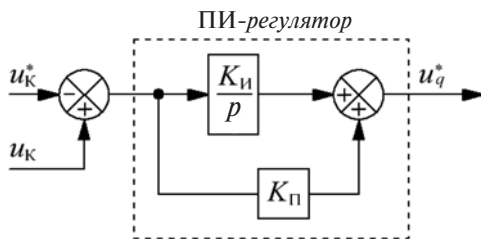


Рис. 5. Структурная схема алгоритма регулирования напряжения на конденсаторах

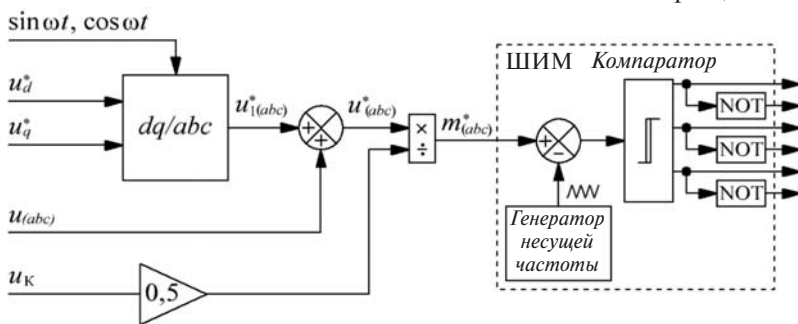


Рис. 6. Блок-схема алгоритма формирования сигналов управления транзисторами преобразователя

пряжения, формируемого преобразователем. Канал регулирования напряжения в системе управления обеспечивает заряд конденсаторов и поддержание требуемого значения напряжения, снижение которого обусловлено потерями мощности в элементах преобразователя.

Структурная схема блока регулирования напряжения на конденсаторах представлена на рис. 5. От измеряемого напряжения $u_к$ вычитается требуемое значение напряжения конденсатора $u_к^*$. Разница поступает на ПИ-регулятор, выходной сигнал которого определяет q -составляющую напряжения задания u_q^* , так как для подзарядки конденсаторов требуется потреблять из сети активную мощность, что соответствует d -составляющей тока.

Значения u_d^* и u_q^* подаются на вход блока формирования сигналов управления преобразователем (рис. 6). Сигнал задания по q -составляющей напряжения, отвечающий за управление активной мощностью регулятора, и управляющий сигнал по d -составляющей, определяющий регулирование реактивной мощности, поступают на вход блока обратного преобразования синхронных координат в стационарные abc -координаты:

$$\begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & \cos \omega t \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_d \\ s_q \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Полученное напряжение суммируется с напряжением сети $u_{(abc)}$, которое соответствует сигналу напряжения задания преобразователя $u_{(abc)}^*$. Перед подачей сигнала задания на ШИМ-модуль сигнал задания масштабируется к половине напряжения конденсатора $u_к/2$.

Компьютерное моделирование регулятора. На основе предложенного алгоритма разработана упрощённая компьютерная модель, в которой силовой регулятор имитируется источниками тока. Ротор АСГ вращается с постоянной частотой 1635 об/мин. Номинальная активная мощность нагрузки 2000 Вт. На рис. 7 изображены результаты моделирования при сбросе/набросе активной нагрузки. В начальный момент происходит пуск асинхронного генератора на номинальную мощность. В момент времени $t=2$ с происходит сброс активной нагрузки до половины номинальной мощности, в результате

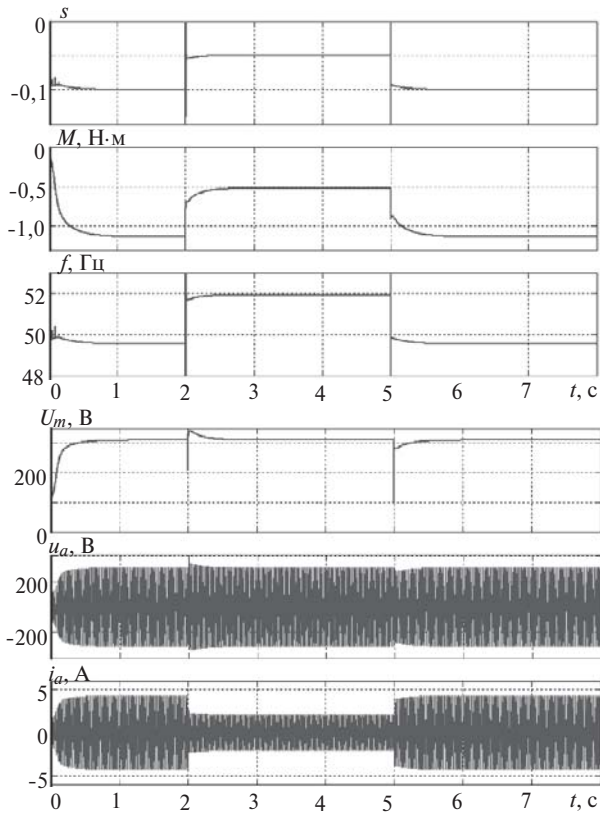


Рис. 7. Результаты моделирования при сбросе/набросе активной нагрузки; графики сверху вниз: скольжение, момент, частота сети, амплитуда напряжения, мгновенное значение напряжения фазы А, мгновенное значение тока нагрузки фазы А

увеличиваются скольжение, электромагнитный момент. Частота сети падает до 47 Гц. Напряжение сети стабилизируется в течение 1,5 с. В момент времени $t = 5$ с происходит возврат к номинальной мощности. Происходит скачок напряжения, который в течение 1 с стабилизируется до номинального значения.

На рис. 8 изображены результаты моделирования при изменении реактивной мощности нагрузки. В начальный момент времени происходит запуск АСГ на номинальную мощность. В момент времени $t = 2$ с подключается реактивная мощность индуктивного характера ($Q = 2$ кВА). В течение 0,5 с скольжение, момент, частота сети и амплитуда напряжения возвращаются к своему прежнему значению (происходит компенсация реактивной мощности). В момент времени $t = 5$ с происходит переключение реактивной нагрузки с индуктивного характера на емкостной ($Q = 2$ кВА). Параметры АСГ и сети в течение 1 с возвращаются к прежнему значению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. — М.: Высшая школа, 1990, 528 с.
2. Yogesh K. Chauhan, Sanjay K. Jain and Bhim Singh. A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications. — IEEE Transactions on

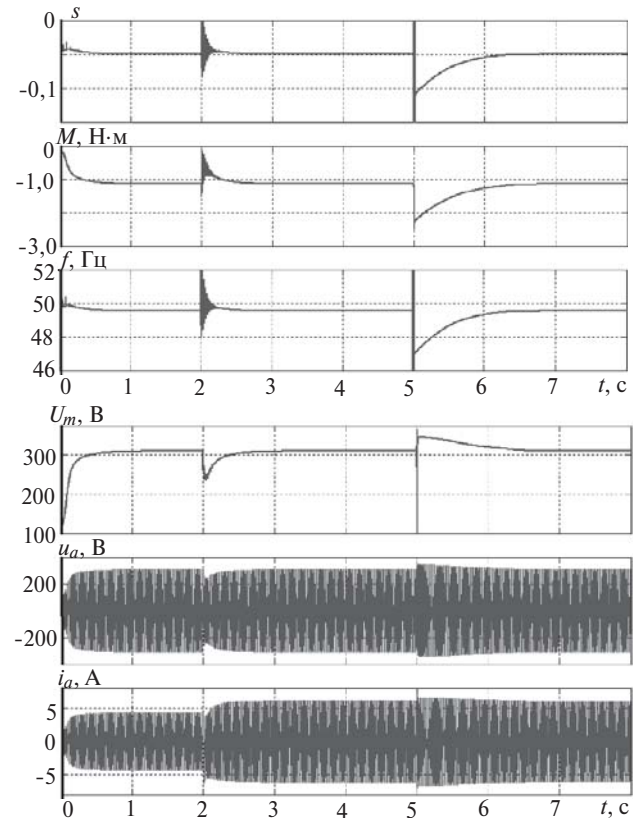


Рис. 8. Результаты моделирования при изменении реактивной мощности нагрузки; графики сверху вниз: скольжение, момент, частота сети, амплитуда напряжения, мгновенное значение напряжения фазы А, мгновенное значение тока нагрузки фазы А

Industry Applications, March/April 2010, vol. 46, No. 2, pp. 720–730.

3. Ryvkin S., Valiev M., Fligl S., Bauer J. Control of Island Mode Working Induction Generator Based on State Space Controller. — Proceedings of 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC2014), Antalya (Turkey), 21–24 September 2014, pp. 527–532.

4. Akagi H. Active filters for power conditioning. The power electronics handbook/Ed. by T.L. Skvarenina. Section 17.4. — USA: CRC Press, 2002, pp. 1312–1322.

5. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника: Учебник для вузов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 632 с.

6. Espinoza J.R. Closed-loop operation of inverters. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications/Ed. by M.H. Rashid, 3rd Section 15.5. — USA: Elsevier, 2011, 1390 p.

7. Rozanov Y., Lepanov M., Kiselev M. Multifunctional power quality controller based on power electronic converter. — Proceedings of 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC2014), Antalya (Turkey), 21–24 September 2014, pp. 1011–1016.

[19.10.15]

Авторы: Ель Алами Ахмед окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1989 г. Профессор по направлению «Электротехника» в Высшей школе техники Университета Хассана II, Касабланка, Королевство Марокко. Аспирант кафедры «Электрические и электронные аппараты» МЭИ.

Киселев Михаил Геннадьевич окончил Институт электротехники МЭИ в 2008 г. Ассистент кафедры «Электрические и электронные аппараты» МЭИ.

The Power Electronic Voltage Regulator of an Asynchronous Generator

EL'ALAMI Akhmed (*Higher Technical School of Khassan II University, Casablanca, Kingdom of Morocco*) – Professor and Ph. D. Student (*Moscow Power Engineering Institute – MPEI, Moscow, Russia*)

KISELEV Mikhail Gennad'yevich (*MPEI, Moscow, Russia*) – Assistant of the Department

The article describes a device for starting and controlling the voltage of an asynchronous generator used as part of a wind power plant under the conditions of varying the load active and reactive power levels. The startup and control are performed using a power electronic regulator of reactive power of both signs. The reactive power regulator is made using an AC/DC converter with fully controlled switches and with an electrolytical capacitor on the converter's DC side. The converter is controlled using pulse-width modulation methods. The control system structural diagram and the principle of synchronizing the generator output voltage are presented, and the results from computer simulation of the generator startup and load variation modes are given.

Key words: wind power plant, asynchronous generator, generator startup mode, reactive power compensation, power electronic converter, control by means of pulse-width modulation methods

REFERENCES

1. **Bruskin D.E., Zorokhovich A.E., Khvostov V.S.** *Elektricheskiye mashiny i mikromashiny* (Electrical machines and micromachines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1990, 528 p.
2. **Yogesh K. Chauhan, Sanjay K. Jain and Bhim Singh.** A Prospective on Voltage Regulation of Self-Excited Induction Generators for Industry Applications. — IEEE Transactions on Industry Applications, March/April 2010, vol. 46, No. 2, pp. 720–730.
3. **Ryvkin S., Valiev M., Fligl S., Bauer J.** Control of Island Mode Working Induction Generator Based on State Space Controller. — Proceedings of 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC2014), Antalya (Turkey), 21–24 September 2014, pp. 527–532.
4. **Akagi H.** Active filters for power conditioning. The power electronics handbook/Ed. by T.L. Skvarenina. Section 17.4. — USA: CRC Press, 2002, pp. 1312–1322.
5. **Rozaov Yu.K., Ryabchitskii M.V., Kvasnyuk A.A.** *Silovaya elektronika: Uchebnik dlya vuzov* (Power electronics. Textbook for Higher education institutions). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2007, 632 p.
6. **Espinoza J.R.** Closed-loop operation of inverters. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications/Ed. by M.H. Rashid, 3rd Section 15.5. — USA: Elsevier, 2011, 1390 p.
7. **Rozaov Y., Lepanov M., Kiselev M.** Multifunctional power quality controller based on power electronic converter. — Proceedings of 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC2014), Antalya (Turkey), 21–24 September 2014, pp. 1011–1016.

* * *

IX Международная (XX Всероссийская) конференция

по автоматизированному электроприводу АЭП-2016 (ICPDS'2016) (3–7 октября 2016 г., Пермь)

Организаторы конференции: Министерство образования и науки РФ; Академия электротехнической наук РФ; Российское отделение IEEE; Национальный исследовательский университет «МЭИ»; Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); Ассоциация инженеров по электроприводу

Почетный председатель конференции: проф. Г.Б. Онищенко (Россия)

Сопредседатели конференции: проф. Н.Д. Рогалев (ректор МЭИ, Россия); проф. А.А. Ташкинов (ректор ПНИПУ, Россия)

Темы конференции:

Общие и теоретические вопросы электропривода; Системы управления электроприводов; Силовая электроника в электроприводе; Электрические машины; Инжиниринг, промышленные, транспортные применения автоматизированных электроприводов и электрических комплексов; Подготовка и переподготовка инженерных и научных кадров в электротехнике

Требования к оформлению материалов представлены на сайте <http://icpds.pstu.ru>

ВНИМАНИЕ! Научные статьи, подготовленные и представленные на английском языке авторами докладов, будут переданы в электронную библиотеку IEEE Xplore для индексации в SCOPUS.

Реквизиты секретариата: 614013 Пермь, ул. Профессора Поздеева, 7, ПНИПУ, кафедра МСА, секретариат АЭП-2016

Телефон/факс: ПНИПУ: +7(342)239 18 21 Калинин Иван Сергеевич,

МЭИ: +7(495)362 74 25 Юркова Людмила Алексеевна

Web:<http://icpds.pstu.ru> (<http://icpds.pstu.ru/>) E-mail: icpds2016@pstu.ru (<mailto:icpds2016@pstu.ru>).

Загрузить информационное сообщение конференции АЭП-2016 (/ICPDS_2016.pdf)

Требования к оформлению публикаций (/ofornlenie.doc)

