

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор БУТЫРИН ПАВЕЛ АНФИМОВИЧ**

**Секция теоретических основ электротехники,  
преобразовательной техники, электротехнических материалов**

**Бутырин П.А.**, член-корр. РАН, председатель секции, **Козлов В.Н.**, доктор техн. наук, проф., **Коровкин Н.В.**, доктор техн. наук, проф., **Коротеев А.А.**, академик РАН, **Лагарьков А.Н.**, академик РАН, **Рашиди-Хасри Ф.** (Швейцария), проф., **Розанов Ю.К.**, доктор техн. наук, проф., **Серебрянников С.В.**, доктор техн. наук, проф.

Научный редактор **Евсеев Б.Н.**

**Секция электроэнергетики**

**Строев В.А.**, доктор техн. наук, проф., председатель секции, **Воропай Н.И.**, член-корр. РАН, **Коган Ф.Л.**, доктор техн. наук, **Кучеров Ю.Н.**, доктор техн. наук, **Новиков Н.Л.**, доктор техн. наук

Научный редактор **Кудинова Л.С.**

**Секция техники высоких напряжений, электрических аппаратов, трансформаторов**

**Белкин Г.С.**, доктор техн. наук, **Корявин А.Р.**, доктор техн. наук, **Раков В.А.**, проф. (США), **Хомич В.Ю.**, академик РАН

Научный редактор **Кудинова Л.С.**

**Секция электрических машин**

**Беспалов В.Я.**, доктор техн. наук, проф., председатель секции, **Ковалев К.Л.**, доктор техн. наук, проф., **Шакарян Ю.Г.**, доктор техн. наук, проф.

Научный редактор **Евсеев Б.Н.**

**Секция электропривода и автоматизации технологических процессов**

**Красовский А.Б.**, доктор техн. наук, проф., председатель секции, **Бааке Э.**, проф. (Германия), **Демидович В.Б.**, доктор техн. наук, проф.

Научный редактор **Евсеев Б.Н.**

Заместитель главного редактора **Б.Н. Евсеев**

Ответственный секретарь **Л.С. Кудинова**

Литературный редактор **Т.П. Александрова**

Младший редактор **Н.В. Чечунова**

Компьютерная верстка **Н.Н. Мерзляков**

Перевод на английский язык **В.И. Филатов**

**Почтовый адрес редакции:** 111250 Москва, Красноказарменная ул. 14  
НИУ «МЭИ», редакция журнала «Электричество»

**Адрес редакции:** Москва, НИУ «МЭИ», каф. ТОЭ, корпус «З», первый этаж

**Телефон** (495) 362-7485

**E-mail:** [etr1880@mail.ru](mailto:etr1880@mail.ru); [etr1880@mpei.ru](mailto:etr1880@mpei.ru)

<http://etr1880.mpei.ru>

**Полные тексты статей в формате pdf размещены на сайте**

**Научной электронной библиотеки (НЭБ):** [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)

Подписано в печать 12.07.2019. Формат 60×84 $\frac{1}{8}$ . Тираж 240 экз.  
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Печ. л. 8,5 Заказ . Цена свободная

Свидетельство о регистрации № 0110272 от 8 февраля 1993 г.  
Министерства печати и информации Российской Федерации

Издатель: НИУ «МЭИ»  
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».

Theoretical and scientific-practical journal

# ELEKTRICHESTVO

ESTABLISHED IN JULY 1880

**№ 8, 2019**

## FOUNDERS

Russian Academy of Sciences  
(the Division of Power Engineering, Mashinary Construction,  
Mechanical and Control Processes)

## THE EDITORIAL BOARD OF THE JOURNAL ELEKTRICHESTVO

**Editor-in-Chief Pavel A. Butyrin, Corresponding Member  
of the Russian Academy of Sciences, Moscow Power Engineering Institute (MPEI)**

### **Section for Theoretical Principles of Electrical Engineering, Converter Systems, and Electrical Materials**

**P.A. Butyrin** (Moscow), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, MPEI, Section Chairman; **V.N. Kozlov** (St. Petersburg), Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Polytechnic University; **N.V. Korovkin** (St. Petersburg), Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg State Polytechnic University; **A.A. Koroteyev** (Moscow), Academician of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute; **A.N. Lagar'kov** (Moscow), Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Theoretical and Applied Electrodynamics; **F. Rachidi-Haeri** (Lausanne), Professor, Federal Polytechnic Institute in Lausanne (Switzerland); **Yu. K. Rozanov** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), Professor, MPEI; **S.V. Serebryannikov** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), Professor, MPEI.

Scientific Editor **B.N. Yevseyev**

### **Section for Electric Power Engineering**

**V.A. Stroev** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), Professor, MPEI, Section Chairman; **N.I. Voropai** (Irkutsk), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Institute of Energy Systems, Siberian Division, Russian Academy of Sciences; **F.L. Kogan** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.); **Yu.N. Kucherov** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), OJSC "System Operator of the Unified Energy System"; **N.L. Novikov** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), OJSC "Scientific and Technical Centre of the Federal Grid Company of the Unified Energy System".

Scientific Editor **L.S. Kudinova**

### **Section for High-Voltage Engineering, Electrical Apparatuses, and Transformers**

**G.S. Belkin** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), All-Russian Institute of Electrical Engineering; **A.R. Koryavin** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), All-Russian Institute of Electrical Engineering; **V.A. Rakov**, Professor and Co-Director of ICLRT University of Florida (USA); **V.Yu. Khomich** (Moscow), Academician of the Russian Academy of Sciences, Institute of Electrophysics and Electric Power Engineering, Russian Academy of Sciences.

Scientific Editor **L.S. Kudinova**

### **Section of Electrical Machines**

**V.Ya. Besspalov** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), Professor, MPEI, Section Chairman; **K.L. Kovalev** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Aviation Institute; **Yu.G. Shakaryan** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), Professor, OJSC "Scientific and Technical Centre of the Federal Grid Company of the Unified Energy System".

Scientific Editor **B.N. Yevseyev**

### **Section of Electric Drives and Automation of Technological Processes**

**A.B. Krasovskii** (Moscow), Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow State Technical University, Section Chairman; **E. Baake** (Hannover), Professor Dr.-Eng., Leibniz University of Hannover (Germany); **V.B. Demidovich** (St. Petersburg), Dr. Sci. (Eng.), Professor, St. Petersburg University of Electrical Engineering.

Scientific Editor **B.N. Yevseyev**

Deputy Editor-in-Chief **B.N. Yevseyev**

Executive Secretary **L.S. Kudinova**

Literature Editor **T.P. Aleksandrova**

Junior Editor **N.V. Chechunova**

Computer-aided make-up **N.N. Merzlyakov**

Translator **V.I. Filatov**

---

**Editorial office address:** «NRU «Moscow Power Engineering Institute», Krasnokazarmennaya, 14,  
Moscow, 111250 Russia

**tel/fax (495) 362-7485**

**E-mail: [etr1880@mail.ru](mailto:etr1880@mail.ru); [etr1880@mpei.ru](mailto:etr1880@mpei.ru)**

**<http://etr1880.mpei.ru>**

**Full text articles in PDF format available on the website of the**

**Scientific Electronic Library: [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)**

---

**Publisher of the journal:**

**«NRU «Moscow Power Engineering Institute»**

ИЗДАЕТСЯ С ИЮЛЯ 1880 ГОДА

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

8  
АВГУСТ  
2019

## ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

УЧРЕДИТЕЛЬ: РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК (Отделение энергетики, машиностроения, механики  
и процессов управления)

### СОДЕРЖАНИЕ

### CONTENTS

Крюков Д.О., Манусов В.З. Обзор конструкций трансформаторов со сверхпроводящими обмотками. . . . .

4

D.O. Kryukov and V.Z. Manusov, A Review of Constructions of Transformers with Superconducting Windings . . . . .

4

Давыдов С.Г., Долгов А.Н., Корнеев А.В., Пшеничный А.А., Якубов Р.Х. Развитие импульсного дугового разряда в вакуумном диоде с искровым поджигом. . . . .

17

S.G. Davydov, A.N. Dolgov, A.V. Korneyev, A.A. Pshenichnyi, R.Kh. Yakubov, Development of Impulse Arc Discharge in a Spark-Ignited Vacuum Diode . . . . .

17

Куприенко В.М. Защита зданий и сооружений раз-  
новысокими стержневыми молниеотводами . . . . .

24

V.M. Kuprienko, Protection of Buildings and Structures by Means of Lightning Rods Having Different Heights . . . . .

24

Сенцов Ю.И., Хмельщиков М.В. О молниестойко-  
сти ракет космического назначения . . . . .

30

Yu.I. Sentsov and M.V. Khmel'shchikov, On the Lightning Resistance of Space Rockets. . . . .

30

Антипов В.Н., Грозов А.Д., Иванова А.В. Электри-  
ческие генераторы мегаваттной мощности для  
ветроэнергетики: состояние и тенденции разви-  
тия . . . . .

34

V.N. Antipov, A.D. Grozov, A.V. Ivanova, Megawatt-Range Electrical Generators for Wind Power: State of the Art and Development Trends . . . . .

34

Ковалев К.Л., Иванов Н.С., Тулинова Е.Е., Кадеров  
В.А. Аналитический метод расчета параметров  
сверхпроводниковой электрической машины с  
ферромагнитопроводом. . . . .

42

K.L. Kovalev, N.S. Ivanov, Ye.Ye. Tulinova, V.A. Kaderov, An Analytical Method for Calculating the Parameters of a Superconducting Electrical Machine with a Ferromagnetic Core . . . . .

42

Гридин В.М. Бесконтактный двигатель постоян-  
ного тока с мягкой механической характери-  
стикой . . . . .

51

V.M. Gridin, A Contactless DC Motor with a Soft Mechanical Characteristic . . . . .

51

Богуславский И.З., Кручинина И.Ю., Хозиков  
Ю.Ф., Штайнле Л.Ю. Быстроходные электроме-  
ханические преобразователи энергии: оптимиза-  
ция геометрии активной зоны ротора на основе  
требований механической прочности . . . . .

57

I.Z. Boguslavskiy, I.Yu. Kruchinina, Yu.F. Khozikov, L.Yu. Shtainle, High-Speed Electromechanical Power Converters: Optimizing the Rotor's Active Zone Geometry Proceeding from Mechanical Strength Requirements . . . . .

57

Афанасьев А.А. К расчету беспазового магнито-  
электрического вентильного двигателя . . . . .

62

A.A. Afanas'yev, To Calculation of Slotless and Brushless Motor with Permanent Magnets . . . . .

62

### ХРОНИКА

### CHRONICLE

Павел Анфимович Бутырин  
(К 70-летию со дня рождения) . . . . .

67

Pavel Anfimovich Butyrin  
(to Mark the 70th Anniversary) . . . . . 67