

Сравнительный анализ параметров и характеристик управляемых выпрямителей для кораблей арктического региона

ПОСПЕЛОВ В.Я., КУЗЬМИН И.Ю., ЧЕРЕВКО А.И., ПОТЕГО П.И., ДУШКИН Ю.В.,
САКОВИЧ И.А.

Рассмотрены причины возникновения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) в автономных электроэнергетических системах и отмечено, что основным способом улучшения ЭМС является повышение числа фаз выпрямления. Добиться этого можно за счет совершенствования силовой схемы преобразователя, заменив в ней трансформаторы с пульсирующими магнитными полями (ТПМП) трансформаторами с вращающимися магнитными полями (ТВМП). При реализации данного предложения была проведена опытно-конструкторская работа с участием СПО «Арктика» (АО «ОСК»), в результате которой созданы управляемые выпрямители (УВ) с ТВМП мощностью 4 и 12 кВт. Сравнительный анализ параметров и характеристик выпрямителей, построенных по различным схемам, с более чем пятьюдесятью отечественными выпрямителями, построенными на базе ТПМП, показал, что по таким критериям, как коэффициент пульсаций по напряжению, коэффициент полезного действия, обобщенный коэффициент мощности, удельный объем и удельная масса, УВ с ТВМП превосходят УВ с ТПМП как по энергетическим, так и по массогабаритным характеристикам.

К л ю ч е в ы е с л о в а: автономная электроэнергетическая установка, электромагнитная совместимость, управляемый выпрямитель, трансформатор с вращающимся магнитным полем, параметры и характеристики, сравнительный анализ

Силовые полупроводниковые выпрямители мощностью от единиц до нескольких сотен киловатт относятся к наиболее востребованным типам преобразователей электрической энергии [1]. Зарядка аккумуляторных батарей, питание обмоток размагничивания, катодная защита корпуса корабля, основное и аварийное питание радио- и электронной аппаратуры, электродвижение, питание обмоток возбуждения турбогенераторов и стартерного электропривода – это далеко не полный перечень областей применения силовых выпрямителей. Кроме того, выпрямители являются входными звеньями инверторов и статических преобразователей частоты.

Большинство выпрямителей выполняется по трехфазным мостовым схемам, которые, с одной стороны, представляют собой симметричную нагрузку по отношению к питающей трехфазной сети, а с другой, в меньшей степени подвержены влиянию асимметрии питающих напряжений. Вместе с тем известно, что полупроводниковые преобразователи с трехфазными мостовыми схемами выпрямления имеют невысокий обобщенный коэффициент мощности (с $\xi 0,8$) и являются источниками кондуктивных помех [1, 2, 3]. При этом высшие гармоники в их входных токах и напряжениях вызывают дополнительные тепловые потери в обмотках генераторов и кабельных трассах, а также сбои в работе микропроцессорных систем управления

различного назначения, включая собственные системы управления выпрямителями [1, 2].

Однако применение мощных выпрямителей в автономных электроустановках, в том числе в электроэнергетических системах (ЭЭС) кораблей и судов Арктического региона, в которых мощности преобразователей соизмеримы с мощностью источников, создает серьезные проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) преобразователей с питающей сетью и нагрузкой [1–3].

Известно, что требуемый уровень ЭМС в автономных электроустановках можно обеспечить за счет [1, 2]: общесистемных мероприятий; индивидуальных мероприятий по защите особо ответственных потребителей; совершенствования силовой структуры полупроводниковых преобразователей.

Первые два мероприятия предполагают применение пассивных резонансных LC-фильтров, широкополосных пассивных Т- и П-образных LC-фильтров, активных фильтров и компенсаторов реактивной мощности. При мощности таких устройств от 100 кВт их массогабаритные и стоимостные показатели возрастают до уровня, сопоставимого с показателями самих выпрямительных агрегатов, вследствие чего применение таких дополнительных устройств для обеспечения требуемого уровня ЭМС приводит к удвоению и даже утроению удельных массогабаритных характеристик выпрямительных агрегатов.

Третий способ обеспечения ЭМС основан на совершенствовании силовых схем самих полупроводниковых преобразователей. Например, за счет применения эквивалентного 12-пульсного режима выпрямления удается скомпенсировать высшие гармоники тока, генерируемые преобразователем в питающую сеть, с порядковыми номерами $n = 6k - 1$ и подавить в кривой выпрямленного напряжения четные гармоники с порядковыми номерами $n = 6k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$, [1, 3].

Замена согласующих трансформаторов с пульсирующими магнитными полями (ТПМП) трансформаторами с вращающимися магнитными полями (ТВМП) и разработка мощных силовых ключей (IGBT, IGCT) открывает новые возможности совершенствования силовых схем полупроводниковых преобразователей и алгоритмов управления ими, что ограничивает увеличение массогабаритных и стоимостных показателей самих преобразователей и позволяет количественно уменьшить факторы, ухудшающие ЭМС.

Исследования показали, что одним из перспективных путей снижения уровня искажений кривых токов и напряжений на входе силового выпрямителя является способ, основанный на увеличении фазности выпрямления. С ее увеличением существенно повышаются энергетические показатели силового выпрямителя, а также уменьшается коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения, что позволяет комплексно решать проблему ЭМС.

Для подтверждения эффективности данного технического направления на предприятии оборонно-промышленного комплекса ПАО «СПО «Арктика» (АО «ОСК») была проведена опытно-конструкторская работа (ОКР) с целью создания опытного образца управляемого выпрямителя (УВ) на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП) мощностью 4 кВт (шифр «УВ-4»). Также был спроектирован и изготовлен экспериментальный образец УВ на базе ТВМП мощностью 12 кВт (шифр «УВЭ-12»). Работа проводилась по заказу Минпромторга РФ по федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники на 2009–2016 гг.». Были решены следующие задачи:

разработана методика расчета ТВМП, учитывающая особенности его работы в составе УВ с обеспечением требуемого качества электроэнергии за счет применения укороченных обмоток, имеющих дробное число пазов на полюс и фазу, и выбора оптимальной геометрии магнитной цепи;

выполнен электромагнитный и тепловой расчеты ТВМП [4] с использованием отечественного программного продукта ELCUT, осуществляющего

моделирование магнитного, электрического и теплового полей методом конечных элементов;

разработана методика расчета энергетических характеристик УВ с ТВМП в симметричных и несимметричных режимах работы с использованием программного продукта MATLAB Simulink (SimPowerSystems) [5];

разработаны микропроцессорные системы управления замкнутого типа, обладающие высоким быстродействием и точностью, снабженные функциями самодиагностики.

Исследовательские и предварительные испытания образцов УВ с ТВМП экспериментально подтвердили их высокие тактико-технические характеристики, заложенные при расчете и проектировании. Достигнуто существенное улучшение качества выпрямленного напряжения без применения конденсаторных батарей и сглаживающих реакторов и сохранено высокое качество напряжения при глубоком регулировании его по значению (от 10 до 100% номинального). Для примера на рис. 1 показана осциллограмма питающего фазного и выпрямленного напряжения УВ с ТВМП при нулевом угле управления $\alpha = 0^\circ$, зарегистрированная при испытаниях с помощью цифрового осциллографа LeCroy.

Спектральный анализ кривой выпрямленного напряжения $u_d(t)$ (рис. 1), выполненный в программе MATLAB, показывает, что значение коэффициента пульсаций по напряжению не превышает 0,7% при номинальной нагрузке 4 кВт.

Было проведено комплексное сравнение образцов УВ с ТВМП с отечественными выпрямительными агрегатами (серий ВАКС, ТПС, СПП и др.), рассмотрено свыше 50 аналогов и предложено ввести следующие сравнительные критерии:

коэффициент пульсаций выходного напряжения k_p ;

коэффициент полезного действия η ;

обобщенный коэффициент мощности s , определяемый как произведение коэффициента искажения кривой питающего напряжения на коэффициент искажения кривой входного тока и на косинус угла сдвига между основными гармониками питающего тока и напряжения:

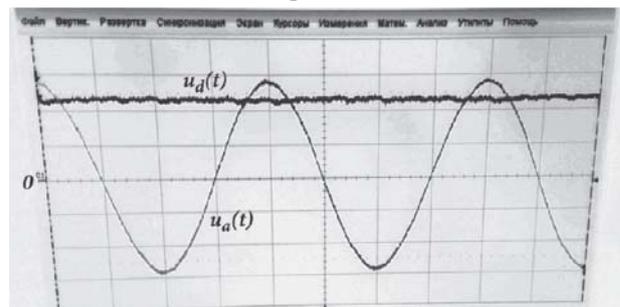


Рис. 1. Осциллограммы питающего $u_a(t)$ и выпрямленного $u_d(t)$ напряжения в неуправляемом режиме при $\alpha = 0^\circ$

$$c = k_{иск}^U k_{иск}^I \cos j ; \quad (1)$$

удельный объем – объем (включая сглаживающий фильтр, если имеется), отнесенный к номинальной мощности выпрямительного агрегата;

удельная масса – масса (включая сглаживающий фильтр, если имеется), отнесенная к номинальной мощности выпрямительного агрегата.

Предложенные критерии обеспечивают разностороннее сравнение выпрямителей по тактико-техническим, энергетическим и массогабаритным характеристикам. Результаты сравнительного анализа представлены в виде гистограмм. Характе-

ристики преобразователей, построенных на базе ТВМП, на гистограммах выделены черным цветом и указаны стрелками.

По результатам сравнительного анализа можно сделать следующие выводы. 1. По коэффициенту пульсаций выпрямленного напряжения (рис. 2) образцы УВ с ТВМП, не содержащие выходного сглаживающего фильтра, имеют наименьший коэффициент пульсаций выходного напряжения, конкурируя по данному параметру только с выпрямителями класса СПП, которые снабжены реактивными фильтрами низких частот, так как в них используется ШИМ. Остальные сравниваемые вы-

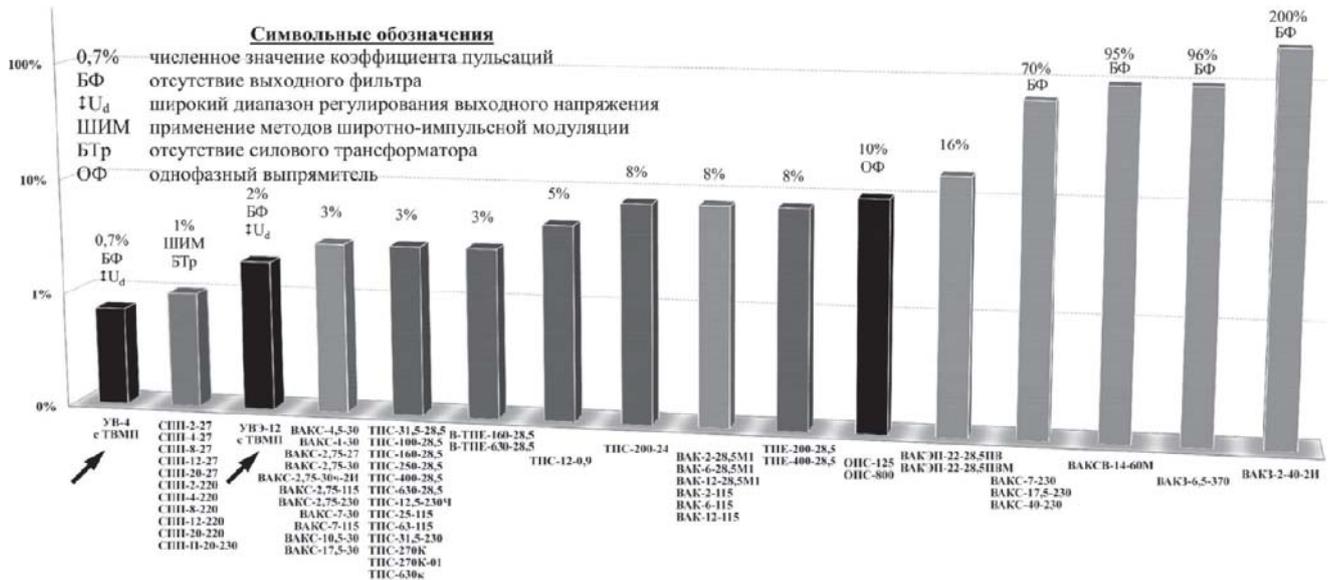


Рис. 2. Сравнительный анализ УВ с ТВМП с отечественными выпрямителями по коэффициенту пульсаций напряжения (логарифмическая шкала по оси ординат)

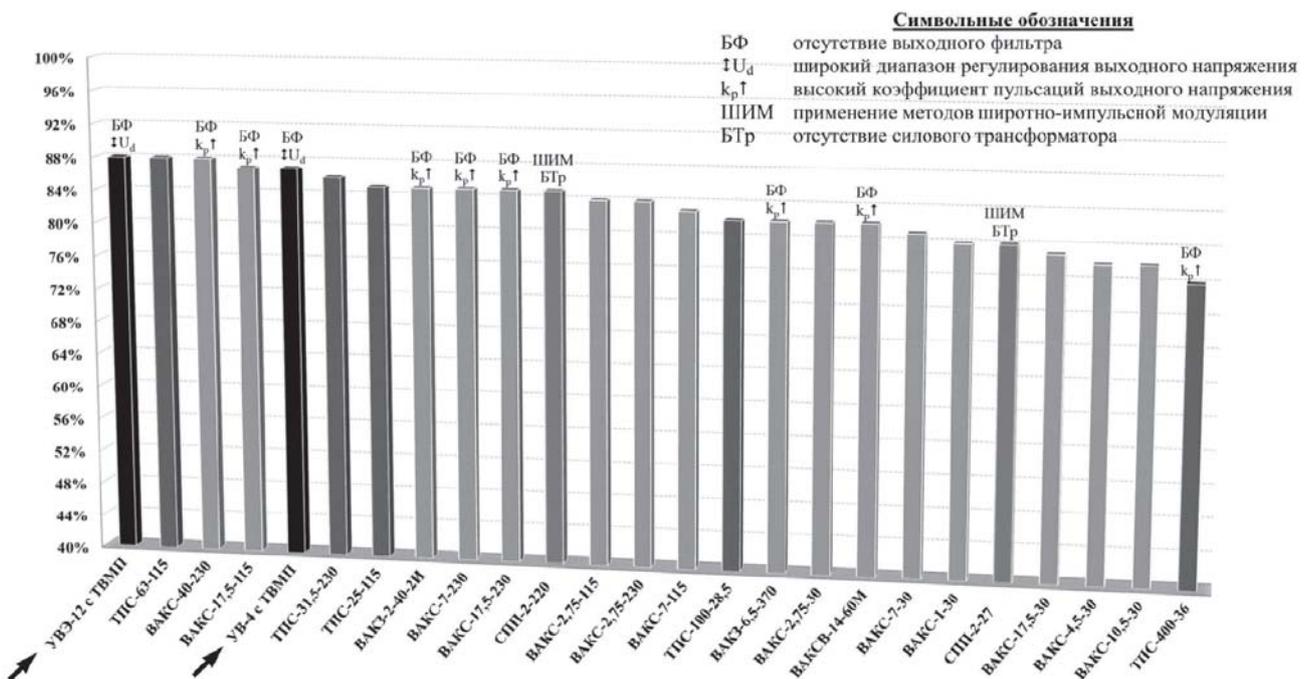


Рис. 3. Сравнительный анализ УВ с ТВМП с отечественными выпрямителями по КПД

шенной электромагнитной совместимостью с питающей сетью и нагрузкой позволили руководству предприятия ПАО «СПО «Арктика» принять решение о внедрении разработанных выпрямителей в производство. Было решено также продолжить использование энергии вращающихся магнитных полей в процессе разработки и создания автономных инверторов, а на их базе – преобразователей частоты и обратимых преобразователей для автономных электроэнергосистем двойного рода тока.

Материалы статьи доложены и одобрены на Международной конференции «Взгляд в будущее» [7], проходившей в ЦКБ МТ «Рубин».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Силовая электроника. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007, 632 с.
2. Черевко А.И. Полупроводниковые преобразователи автономных электроустановок с трансформаторами вращающегося магнитного поля, обладающие высоким качеством выходного напряжения. – Архангельск: Изд-во Архангельского государственного технического университета, 2005.
3. Дмитриев Б.Ф., Рябенький В.М., Черевко А.И., Музыка М.М., Солюянов П.В. Судовые полупроводниковые преобразователи. – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2011, 526 с.
4. Лимонникова Е.В., Черевко А.И., Кузьмин И.Ю., Музыка М.М. Тепловые режимы работы трансформаторов с вращающимися магнитными полями/Под ред. Е.В. Лимонниковой. – Архангельск: ИД Северного (арктического) федерального университета, 2014, 82 с.
5. Музыка М.М., Лимонникова Е.В., Платоненков С.В., Черевко А.И., Сакович И.А., Кузьмин И.Ю. Исследование эффективности работы управляемых выпрямителей методами математического моделирования в МС и/или Matlab/Под ред. А.И. Черевко. – Архангельск: ИД Северного (арктического) федерального университета, 2014, 107 с.
6. Патент № 2525298 (РФ). Трансформатор с трехфазной и круговой обмотками/ И.Ю. Кузьмин, Е.В. Лимонникова, М.М. Музыка, С.В. Платоненков, П.И. Потего, И.А. Сакович, А.И. Телепнев А.И. Черевко. – БИ, 2014, № 22.
7. Кузьмин И.Ю., Поспелов В.Я., Потего П.И., Черевко А.И. Сравнительный анализ параметров и характеристик управляемых выпрямителей, построенных на базе ТВМП, разработанных для кораблей и судов Арктического региона, с отечественными выпрямителями. – Материалы XIII молодежной научно-технической конференции «Взгляд в будущее – 2015». – СПб: ПАО «ЦКБ МТ «Рубин», 2015, 560 с.

[23.11.15]

Авторы: Поспелов Владимир Яковлевич окончил в 1980 г. Севмашвуз – филиал Ленинградского кораблестроительного института (ЛКИ) – ныне Северный (арктический) федеральный университет (СФУ) в Северодвинске. Член Совета директоров ПАО «СПО «Арктика», канд. техн. наук.

Кузьмин Илья Юрьевич окончил в 2011 г. Севмашвуз – филиал Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (СПбГМТУ) – ныне СФУ. Инженер-конструктор ПАО «СПО «Арктика».

Черевко Александр Иванович окончил Севмашвуз – филиал ЛКИ в 1971 г. В 2006 г. защитил докторскую диссертацию в Севмашвузе – филиале СПбГМТУ в Северодвинске. Профессор, заведующий кафедрой в Севмашвузе – филиале СФУ.

Потего Петр Иванович окончил Севмашвуз – филиал ЛКИ в 1976 г. Генеральный директор ПАО «СПО «Арктика».

Душкин Юрий Владимирович окончил Севмашвуз – филиал ЛКИ в 2007 г. Зам. Главного инженера ПАО «СПО» Арктика».

Сакович Игорь Александрович окончил Севмашвуз – филиал СПбГМТУ. Преподаватель в этом университете.

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 5, pp. 53–58.

A Comparative Analysis of the Parameters and Characteristics of Controlled Rectifiers Developed for Arctic Ships

POSPELOV Vladimir Yakovlevich (Public Company (PC) «SPO «Arktika», Severodvinsk, Russia) – Member of the Board of Directors

KUZ'MIN Il'ya Yur'yevich (PC «SPO «Arktika», Severodvinsk, Russia) – Engineer-designer, Cand. Sci. (Eng.)

CHEREVKO Aleksandr Ivanovich (Branch of the North (Arctic) Federal University (NFU), Severodvinsk, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

POTEGO Peter Ivanovich (PC «SPO «Arktika», Severodvinsk, Russia) – Director General

DUSHKIN Yurii Vladimirovich (PC «SPO «Arktika», Severodvinsk, Russia) – Deputy Engineer-in-Chief

SAKOVICH Igor' Aleksandrovich (Branch of the NFU, Severodvinsk, Russia) – Lecturer

Factors giving rise to problems concerned with electromagnetic compatibility (EMC) in self-contained electric power systems are considered, and it is pointed out that increasing the number of rectifier pulses is the basic way for improving the situation with EMC in them. This can be achieved through sophisticating the converter power circuit arrangement by replacing the transformers with pulsing magnetic fields (PMFTs) by transformers with rotating magnetic fields (RMFTs). For embodying this proposal, an experimental design work was carried out with participation of SPO Arktika (JSC OSK), as a result of

which controlled rectifiers (CRs) equipped with RMFTs for capacities of 4 and 12 kW have been constructed. A comparative analysis of the parameters and characteristics of rectifiers constructed according to different arrangements on the basis of more than 50 domestically produced rectifiers equipped with RMFTs have shown that RMFT-based CRs outperform PMFT-based CRs in terms of both power performance and weight-and-dimension characteristics, such as voltage ripple coefficient, efficiency, generalized power factor, specific volume, and specific mass.

Key words: independent electric power installation, electromagnetic compatibility, controlled rectifier, transformer with rotating magnetic field, parameters and characteristics, comparative analysis

REFERENCES

1. **Rozanov Yu.K., Ryabchitskii M.V., Kovasnyuk A.A.** *Silovaya elektronika* (Power electronics). Moscow, Publ. House of Moscow Power Engineering Institute, 2007, 632 p.
2. **Cherevko A.I.** *Poluprovodnikovye preobrazovateli avtonomnykh elektroustanovok s transformatorami vrashchayushchegosya magnitnogo polya, obladayushchimi vysokim kachestvom vykhodnogo napryazheniya* (Semiconductor converters of self-contained electric installations equipped with rotating magnetic field transformers featuring a high-quality output voltage). Arkhangel'sk, Publ. Arkhangel'sk State Technical University, 2005, 115 p.
3. **Dmitriyev B.F., Ryaben'kii V.M., Cherevko A.I., Muzyka M.M., Soluyanov P.V.** *Sudovye poluprovodnikovye preobrazovateli* (Ship semiconductor converters). St. Petersburg, Publ. St. Petersburg Sea Technical University, 2011, 526 p.
4. **Limonnikova E.V., Cherevko A.I., Kuz'min I.Yu., Muzyka M.M.** *Teplovye rezhimy raboty transformatorov s vrashchayushchimisya magnitnymi polyami/Pod red. E.V. Limonnikovoi* (Head operating modes of transformers with rotating magnetic fields/ Edit. by E.V. Limonnikova. Arkhangel'sk, Publ. North (arctic) Federal University, 2014, 82 p.
5. **Muzyka M.M., Limonnikova E.V., Platonenkov S.V., Cherevko A.I., Sakovich I.A., Kuz'min I.Yu.** *Issledovaniye effektivnosti*

raboty upravlyayemykh vypryamitelei metodami matematicheskogo modelirovaniya v MS i/ili Matlab/Pod red. A.I. Cherevko (Studying the Performance Efficiency of Controlled Rectifiers Using Mathematical Simulation Methods in the MS and/or Matlab Environment.) Arkhangel'sk, Publ. House of the North (arctic) Federal University, 2014, 107 p.

6. **Patent No. 2525298 (RF).** *Transformator s trekhfaznoi i krugovoi obmotkami* (Transformer with three-phase and circular windings/I.Yu. Kuz'min, E.V. Limonnikova, M.M. Muzyka, S.V. Platonenkov, P.I. Potego, I.A. Sakovich, A.I. Telepnev, A.I. Cherevko. – Bulletin of inventions, 2014, No. 22.

7. **Kyz'min I.Yu., Pospelov V.Ya., Potego P.I., Cherevko A.I.** *Sravnitel'nyi analiz parametrov i kharakteristik upravlyayemykh vypryamitelei, postroennykh na baze TVMP, razrabotannykh dlya korablei i sudov Arkticheskogo regiona, s otechestvennymi vypryamitel'yami.* – *Materialy XIII molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (A Comparative Analysis of the Parameters and Characteristics of Controlled Rectifiers Made on the Basis of Transformers with Rotating Magnetic Field Developed for Arctic Ships and Vessels and Fitted with Domestically Produced Rectifiers) – Proc. of the XIII youth scientific-technical conf. «A look into the future–2015». St. Petersburg, Publ. Public Company «TsKB MT «Rubin», 2015, 560 p.

* * *

ЧИТАТЕЛЯМ, ПОДПИСЧИКАМ, РЕКЛАМОДАТЕЛЯМ ЖУРНАЛА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Полные тексты статей в формате .pdf размещены на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки (РУНЭБ): www.elibrary.ru

Для желающих представить в журнал статью сообщаем, что правила подготовки рукописей публикуются в №№ 6 и 12 каждого года и на сайте журнала.

Реклама в черно-белом изображении может быть размещена на страницах журнала и на его обложке, а также в виде вкладки.

Возможно размещение рекламы в цветном изображении.

Стоимость оплаты рекламных статей – по договоренности.

При повторении той же рекламы в следующем номере – скидка 10%. При публикации той же рекламы в третьем и последующих номерах – скидка 20%. Последний срок представления рекламного материала – за 1,5 месяца до выхода номера из печати (обычно номер выходит в середине каждого месяца).

Адрес для переписки: E-mail: etr1880@mail.ru

тел./факс: (495)362-7485