

Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.313.33

doi:10.30987/2658-6436-2022-3-94-100

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ РОТОРОМ

Владимир Петрович Маклаков

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

maklakov-vp@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7107-8233>

Аннотация. Показана актуальность исследования характеристик электромеханических преобразователей с ферромагнитными цельнометаллическими роторами; проведен краткий обзор исследований в этой области. Целью работы является разработка модели электромеханического преобразователя с ферромагнитным ротором. В работе обоснована целесообразность использования полевого подхода при рассмотрении электромагнитных процессов, происходящих в воздушном зазоре и цельнометаллическом роторе таких преобразователей. Описаны принятые допущения и получено решение полевой задачи, позволяющее определять распределение векторного магнитного потенциала в воздушном зазоре и массивном роторе электромеханического преобразователя. Рассмотрены общие принципы построения моделей электромеханических преобразователей, позволяющих выполнять анализ влияния различных конструктивных параметров и свойств материалов и давать рекомендации по их выбору и оптимизации с учетом требуемого вида механической характеристики на этапе предварительного проектирования. Апробация модели проведена на примере расчета механической характеристики электромеханического преобразователя с ферромагнитным цельнометаллическим ротором в режиме электромагнитного тормоза.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, ферромагнитный цельнометаллический ротор, аналитическая модель, векторный магнитный потенциал, магнитная индукция, плотность тока, магнитное число Рейнольдса, механическая характеристика

Для цитирования: Маклаков В.П. Разработка модели электромеханического преобразователя с цельнометаллическим ферромагнитным ротором / Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №3 (17). С. 94-100. doi: 10.30987/2658-6436-2022-3-94-100.

Original article

Open Access Article

DEVELOPING A MODEL OF ELECTROMECHANICAL CONVERTER WITH AN ALL-METAL FERROMAGNETIC ROTOR

Vladimir P. Maklakov

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

maklakov-vp@yandex.ru

Abstract. The article presents the relevance of studying the characteristics of electromechanical converters with ferromagnetic all-metal rotors; gives a brief review of the research in this area. The aim of the work is to develop a model of an electromechanical converter with a ferromagnetic rotor. The paper substantiates the expediency of using the field approach when considering electromagnetic processes occurring in the air gap and the all-metal rotor of such converters. The accepted assumptions are described and the field problem solution is obtained, which makes it possible to determine the distribution of the vector magnetic potential in the air gap and the massive rotor of the electromechanical converter. The general principles of constructing models of electromechanical converters are considered making it possible to analyze the influence of various design parameters and material properties and to give recommendations on their selection and optimization, considering the required type of mechanical characteristic at the preliminary design stage. Testing the model is carried out on the example of calculating the mechanical characteristics of an electromechanical converter with a ferro-magnetic all-metal rotor in the electromagnetic brake mode.

Keywords: Schottky diode, liquid nitrogen, instrument-technological model, TCAD, static characteristics, constructive-technological solution, silicon carbide

For citation: Maklakov V.P. Developing a model of electromechanical converter with an all-metal ferromagnetic rotor. Automation and modeling in design and management, 2022, no. 3 (17). pp. 94-100. doi: 10.30987/2658-6436-2022-3-94-100.

Введение

Электромеханические преобразователи с цилиндрическими цельнометаллическими ферромагнитными роторами характеризуются относительно мягкими механическими характеристиками, что дает возможность создания больших электромагнитных моментов в зоне малых скоростей. Кроме того, применение цельнометаллического ротора значительно упрощает его балансировку, что позволяет использовать такие преобразователи в зоне высоких скоростей. При этом проектирование и разработка электромеханических преобразователей с массивным ротором осложняется недостатком простых и совершенных методов их эффективного моделирования и оптимизации параметров.

Применение имеющихся классических методов расчета электрических машин, основанных на использовании теории электрических цепей для анализа электромеханических преобразователей с массивными роторами сопровождается значительными упрощениями и допущениями, не позволяющими получить достаточно точный результат [1, 2].

В электромеханических преобразователях цельнометаллический ротор, как правило, изготавливается гладким. Поэтому для построения модели такого преобразователя целесообразно использование теории электромагнитного поля. Уровень сложности и точности математической модели формируется совокупностью принятых при ее создании упрощений и допущений. Рациональный подход и приемлемые допущения позволяют существенно упростить математическую модель, получив при этом адекватные результаты.

Построение модели электромеханического преобразователя

При создании модели электромеханического преобразователя использовались принятые в теории электрических машин допущения [3, 4]:

- 1) магнитная проницаемость сердечника статора считается достаточно большой, а потери в его магнитопроводе учитываются с помощью коэффициента насыщения;
- 2) зубчатый воздушный зазор представляется равнозначным гладким, обмотка статора представляется токовым слоем, расположенным на его внутренней поверхности;
- 3) рассматривается двумерная плоскопараллельная задача, а поперечный краевой эффект принимается в расчет с использованием соответствующего коэффициента;
- 4) расчетная схема в цилиндрической системе координат преобразуется в равнозначную схему в декартовой системе;
- 5) характеристика намагничивания ферромагнитного ротора считается линейной. При замене цилиндрической системы координат, свойственной телам вращения, на декартову статор и ротор разворачиваются на плоскости. Если глубина проникновения магнитного поля в тело цельнометаллического ротора существенно меньше его радиуса, эта замена не добавляет значительной ошибки в получаемый результат.

Согласно названным допущениям расчетная схема электромеханического преобразователя с массивным цельнометаллическим ферромагнитным ротором имеет вид, изображенный на рис. 1.

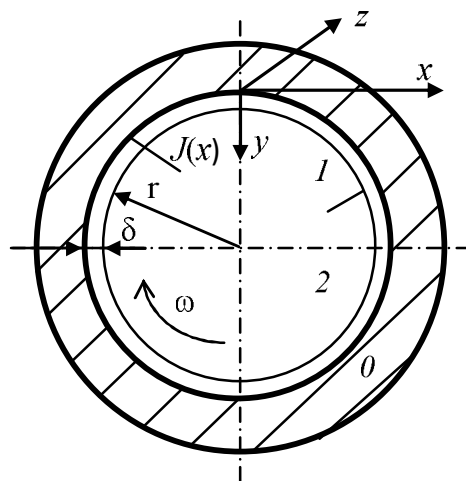


Рис. 1. Расчетная схема электромеханического преобразователя

Fig. 1. Calculation circuit of the electromechanical converter

Зона 0 иллюстрирует гладкий статор преобразователя с магнитной проницаемостью $\mu = \infty$. На внутренней поверхности статора располагается токовый слой с поверхностной плотностью $J(x)$. Плотность поверхностного тока изменяется в направлении x по синусоидальному закону и характеризуется всего одной компонентой направленной по оси z . Зона 2 иллюстрирует вращающийся цельнометаллический ротор преобразователя. Зона 1 иллюстрирует воздушный зазор, величиной δ , разделяющий статор и вращающийся ротор. Ротор вращается с угловой скоростью ω относительно магнитного поля неподвижного статора в обозначенном на расчетной схеме направлении. Применение такой схемы для построения модели дает возможность рассматривать линейные преобразователи или преобразователи с цилиндрическим ротором в различных режимах их работы.

Аналитическое решение задачи расчета магнитного поля в воздушном зазоре и цельнометаллическом роторе электромеханического преобразователя (см. рис. 1), позволяет определить выражение для расчета электромагнитного момента в различных режимах работы. Анализ этого выражения дает возможность оценки влияния различных технологических параметров преобразователя на величину его электромагнитного момента. Это обеспечивает возможность ориентировочного расчета и оптимизации размеров и характеристик материалов ротора преобразователя с целью достижения требуемого вида его механической характеристики.

Решение рассматриваемой полевой задачи целесообразно проводить относительно векторного магнитного потенциала, имеющего при такой ее постановке только z -составляющую. Уравнения Максвелла для преобразователя, представленного рассматриваемой расчетной схемой записываются в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} = \mu_2 \mu_0 \gamma \left(\frac{\partial A_2}{\partial t} + v \frac{\partial A_2}{\partial x} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

где A_1 и A_2 – переменные, определяющие векторный потенциал в зазоре и цельнометаллическом роторе; $\mu_2 \mu_0$ – абсолютная магнитная проницаемость ферромагнитного ротора, γ – удельная проводимость зоны 2, $v = \omega r$ – линейная скорость движения внешнего слоя ротора относительно магнитного поля.

Каждую фазу обмотки статора можно представить совокупностью токовых слоев, получающихся при разложении функции МДС этой обмотки в ряд Фурье в виде:

$$J(x) = I b \sum \frac{K_{ov}}{v} \sin(v \cdot \alpha \cdot x),$$

где I – сила тока обмотки; $\alpha = \pi / \tau$ – коэффициент полюсного деления; τ – полюсное деление; $b = 2w / (p \tau K_n)$ – коэффициент, учитывающий насыщение и параметры обмотки; K_n – коэффициент, учитывающий степень насыщения сердечника обмотки статора; p – количество пар полюсов; w – количество витков; K_{ov} – коэффициенты обмоток статора.

Поскольку плотность тока вдоль внутренней поверхности статора изменяется по гармоническому закону, то закон изменения векторного потенциала образованного этим током, тоже имеет гармонический характер и в комплексной форме эти параметры могут быть вы-

$$\text{ражены как: } J_v = \frac{J_{vm}}{\sqrt{2}}; \dot{A}_{vk} = \frac{A_{vkm}}{\sqrt{2}} e^{-j\varphi_{vk}},$$

где $J_{vm} = I b K_{obv} / v$ – амплитуда гармоники с индексом v ; ($v = 1; 3; 5$); ($k = 1; 2$).

При этом система (1) преобразовывается в форму:

$$\begin{cases} -\alpha_v^2 \dot{A}_{v1} + \frac{\partial \dot{A}_{v1}^2}{\partial y^2} = 0 \\ -\alpha_v^2 \dot{A}_{v2} + \frac{\partial \dot{A}_{v2}^2}{\partial y^2} = -j\alpha_v \mu_2 \mu_0 \gamma v \dot{A}_{v2} \end{cases},$$

Решение этой системы находится в виде:

$$\begin{cases} \dot{A}_{v1} = \dot{C}_{v1} e^{\alpha_v y} + \dot{C}_{v2} e^{-\alpha_v y} \\ \dot{A}_{v2} = \dot{C}_{v3} e^{\lambda_v y} + \dot{C}_{v4} e^{-\lambda_v y} \end{cases},$$

где $\lambda_v^2 = \alpha_v^2 + j\alpha_v \mu_0 \mu_2 \gamma v = \alpha_v^2 (1 + j\varepsilon_v)$; $\varepsilon_v = (\mu_0 \mu_2 \gamma R_r \omega) / \alpha_v$ – магнитное число Рейнольдса.

Вследствие поверхностного эффекта магнитное поле на значительной глубине от поверхности цельнометаллического ротора почти не проявляется. Это обуславливает нулевое значение коэффициента интегрирования \dot{C}_{v3} . Оставшиеся коэффициенты интегрирования определяются из граничных условий тождества на границах раздела нормальных компонентов магнитной индукции и касательных компонентов напряженности. Следующий этап решения выполним для первой гармоники плотности тока, исключив для краткости указания на номера гармоник. При этом система уравнений, по которой определяются недостающие коэффициенты интегрирования имеет вид:

$$\begin{cases} \alpha(\dot{C}_1 - \dot{C}_2) = j\mu_0 & \text{если } y = 0 \\ \left. \begin{aligned} (\dot{C}_1 e^{\alpha\delta} + \dot{C}_2 e^{-\alpha\delta}) &= \dot{C}_4 e^{-\lambda\delta} \\ \alpha\mu_2(\dot{C}_1 e^{\alpha\delta} - \dot{C}_2 e^{-\alpha\delta}) &= -\lambda\dot{C}_4 e^{-\lambda\delta} \end{aligned} \right\} & \text{если } y = \delta \end{cases} \quad (2)$$

Решение системы (2) находится в виде:

$$\dot{C}_1 = j \frac{\mu_0}{2\alpha} \frac{e^{-\alpha\delta} (\alpha\mu_2 - \lambda)}{(-\lambda ch(\alpha\delta) - \alpha\mu_2 sh(\alpha\delta))}; \quad \dot{C}_2 = \frac{-\mu_0 j e^{\alpha\delta} (\alpha\mu_2 + \lambda)}{2\alpha (\lambda ch(\alpha\delta) + \alpha\mu_2 sh(\alpha\delta))}.$$

Определение постоянных интегрирования \dot{C}_1 и \dot{C}_2 позволяет выразить векторный магнитный потенциал в зазоре как:

$$\dot{A}_1 = j \frac{\mu_0}{\alpha} \left(sh(\alpha y) + ch(\alpha y) \frac{\alpha\mu_2 ch(\alpha\delta) + \lambda sh(\alpha\delta)}{-\lambda ch(\alpha\delta) - \alpha\mu_2 sh(\alpha\delta)} \right) = j \frac{\mu_0}{\alpha} (sh(\alpha y) - \dot{C}_5 ch(\alpha y)),$$

$$\text{где } \dot{C}_5 = \frac{ch(\alpha\delta) + \frac{\lambda}{\alpha\mu_2} sh(\alpha\delta)}{sh(\alpha\delta) + \frac{\lambda}{\alpha\mu_2} ch(\alpha\delta)} = \frac{1 + \frac{\lambda}{\alpha\mu_2} th(\alpha\delta)}{th(\alpha\delta) + \frac{\lambda}{\alpha\mu_2}} = \frac{\alpha\mu_2 + \lambda th(\alpha\delta)}{\alpha\mu_2 th(\alpha\delta) + \lambda} = d_1 - jd_2.$$

$$\text{Обозначив } \lambda = \sqrt{\alpha^2 (1 + j\varepsilon)} = \alpha(\beta + j\beta'),$$

где $\beta = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \varepsilon^2}}{2}}$; $\beta' = \frac{\varepsilon}{2\beta}$, выражения для составляющих \dot{C}_5 определяются как:

$$d_1 = \frac{\mu_2^2 th(\alpha\delta) + \mu_2\beta + \beta\mu_2 th^2(\alpha\delta) + \beta^2 th(\alpha\delta) + \beta'^2 th(\alpha\delta)}{(\mu_2 th(\alpha\delta) + \beta)^2 + \beta'^2};$$

$$d_2 = \frac{\mu_2 \varepsilon \beta}{2\beta^2 (\mu_2 sh(\alpha\delta) + \beta ch(\alpha\delta))^2 + \varepsilon^2 ch^2(\alpha\delta)/2}.$$

Среднее значение силы, действующей на цельнометаллический ротор со стороны магнитного поля находится через компоненты магнитного поля как:

$$F_{x0} = \operatorname{Re}[\dot{H}_{1x} \cdot^* B_{1y}],$$

где \dot{H}_{1x} – касательная к поверхности ротора компонента напряженности магнитного поля; B_{1y}^* – сопряженный комплекс перпендикулярной компоненты индукции магнитного поля.

Требуемые компоненты магнитного поля находятся из выражения для векторного магнитного потенциала в воздушном зазоре электромеханического преобразователя. Подстановка их в выражение силы и его дальнейшее преобразование дает:

$$F_{x0} = J^2 \operatorname{Re}[d_2 (-ch^2(\alpha y) + sh^2(\alpha y)) - ch(\alpha y) d_1 d_2 sh(\alpha y)(1-1)] \mu_0 = J^2 \mu_0 d_2.$$

Электромагнитный момент на валу массивного ферромагнитного ротора может быть найден произведением среднего значения силы F_{x0} , его радиуса, площади поверхности и коэффициента краевого эффекта:

$$M = F_{x0} R_r 2\pi R_r l_r K_{ke} = J^2 \mu_0 d_2 2\pi R_r^2 l_r K_{ke},$$

где R_r, l_r – радиус и длина ротора соответственно; K_{ke} – коэффициент краевого эффекта.

При подстановке параметра d_2 и учитывая, что $\varepsilon = 2\beta\sqrt{\beta^2 - 1}$ получим:

$$M = J^2 \frac{2\pi\sqrt{\beta^2 - 1} R_r^2 l_r K_{ke} \mu_0 \mu_2}{(\mu_2 sh(\alpha\delta) + \beta ch(\alpha\delta))^2 + ch^2(\alpha\delta)(\beta^2 - 1)}. \quad (3)$$

Выражение (3) содержит только действительные параметры, что дает возможность достаточно легко находить величину электромагнитного момента на валу цельнометаллического ротора электромеханического преобразователя. Кроме того анализ полученного выражения дает возможность оценить влияние различных параметров преобразователя на величину электромагнитного момента и вид его механической характеристики. Однако полученное выражение содержит гиперболические функции, что существенно осложняет его использование, поэтому требует дальнейшего упрощения. Поскольку большинство электромеханических преобразователей обладают относительной величиной воздушного зазора в пределах $\alpha\delta = 0,01 \dots 0,1$, то, не внося существенной погрешности в получаемый результат, можно допустить, что $sh(x) = x$, а $ch(x) = 1$. При этом выражение (3) примет вид:

$$M = J^2 \frac{2\pi R_r^2 l_r K_{ke} \sqrt{\beta^2 - 1} \mu_0 \mu_2}{(\beta + \mu_2 \alpha\delta)^2 + \beta^2 - 1}. \quad (4)$$

Полученные выражения (3, 4) позволяют построить механические характеристики электромеханического преобразователя в различных режимах его работы при различных значениях его параметров. Кроме того, анализ полученных выражений дает возможность оценки влияния любых конструктивных факторов и свойств материалов на форму механической характеристики и величину электромагнитного момента.

Результаты моделирования

Для примера на рис. 2 приведена механическая характеристика электромеханического преобразователя, выполненного на основе статора стандартного асинхронного двигателя с высотой оси вращения 56 мм. В этом двигателе произведена замена стандартного ротора на цельнометаллический. Радиус ротора составляет 28,26 мм, а его длина – 70 мм. Удельная проводимость материала ротора составляет $\gamma = 3 \cdot 10^6$ См/м. Обмотка статора четырехполосная, а число витков фазы – 812. Размер воздушного зазора между статором и ротором составляет 0,25 мм. Характеристика получена для режима электромагнитного тормоза при постоянном токе 1А в обмотке одной из фаз.

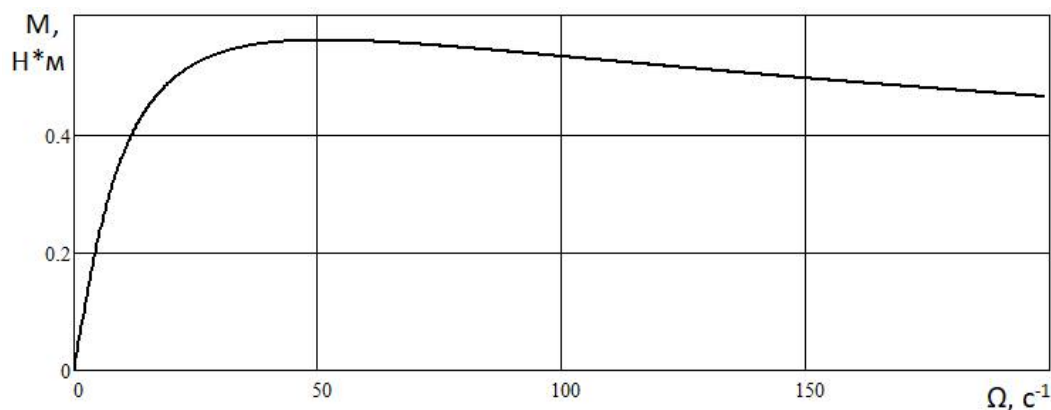


Рис. 2. Механическая характеристика
Fig. 2. Mechanical characteristics

Заключение

Применение полевого подхода позволяет построить аналитическую модель электромеханического преобразователя с цельнометаллическим ферромагнитным ротором. Использование полученной модели дает возможность найти функции распределения векторного магнитного потенциала в воздушном зазоре и цельнометаллическом роторе преобразователя в разнообразных режимах его работы. По известному закону распределения потенциала определяются составляющие напряженности и магнитной индукции в зазоре и роторе преобразователя, которые позволяют определить его электромагнитный момент. Полученные выражения электромагнитного момента (3, 4) позволяют построить механические характеристики электромеханического преобразователя в различных режимах его работы при различных значениях его параметров. Кроме того, анализ полученных выражений дает возможность оценки влияния любых конструктивных факторов и свойств материалов на форму механической характеристики и величину электромагнитного момента. Такая оценка позволяет оптимизировать конструкцию электромеханического преобразователя на этапе его проектирования. Анализ полученных выражений на экстремум позволит найти критические значения параметров и свойств материалов, при которых момент максимален.

Список источников:

References:

1. Математическое моделирование электромеханических устройств с массивными ферромагнитными роторами / Л.А. Потапов, В.П. Маклаков // Вестник БГТУ. – 2004. – №3. – С.97-104.
1. Potapov L.A., Maklakov V.P. Mathematical Modelling of Electromechanical Devices with Massive Ferromagnetic Rotors. Bulletin of BSTU. 2004;3:97-104.
2. Численно-аналитический метод расчета асинхронного двигателя с массивным ротором / Л.А. Потапов, В.П. Маклаков // Электричество. – 2002. – №8. – С.26 – 32.
2. Potapov L.A., Maklakov V.P. Numerical and Analytical Calculation Method of an Induction Motor with a Massive Rotor. Power Engineering. 2002;8:26-32.

3. Моделирование электропривода переменного тока с алгоритмами пространственно-векторной модуляции / Н.В. Чуприна, С.В. Седых, А.А. Пугачев, В.П. Маклаков // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2022. №1 (15). С. 80-88. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-80-88
3. Chuprina N.V., Sedykh S.V., Pugachev A.A., Maklakov V.P. Simulation of AC Electric Drive with Space-Vector Modulation Algorithms. Automation and Modelling in Design and Management. 2022;1(15):80-88. doi: 10.30987/2658-6436-2022-1-80-88.
4. Повышение энергоэффективности тяговых электроприводов с асинхронными двигателями и системой векторного управления / Ю.М. Иньков, А.С. Космодамианский, А.А. Пугачев, С.В. Морозов // Электротехника, 2021. № 9. С. 10 – 15. doi: 10.3103/S1068371221090066
4. Inkov Yu.M., Kosmodamiansky A.S., Pugachev A.A., Morozov S.V. Efficiency Increasing of Traction Electric Drives with Induction Motors and Vector Control System. Russian Electrical Engineering. 2021;9:10-15. doi: 10.3103/S1068371221090066.

Информация об авторах

Владимир Петрович Маклаков

доцент, к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника и электротехника» Брянского государственного технического университета

Information about authors:

Vladimir Petrovich Maklakov

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Industrial Electronics and Electrical Engineering” of Bryansk State Technical University

Статья поступила в редакцию 30.04.2022; одобрена после рецензирования 27.05.2022; принята к публикации 03.06.2022.

The article was submitted 30.04.2022; approved after reviewing 27.05.2022; accepted for publication 03.06.2022.

Рецензент – Михальченко С.Г., доктор технических наук, доцент, Томский университет систем управления и радиоэлектроники.

Reviewer – Mihal'chenko S.G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-ru@mail.ru

Вёрстка С.В. Морозов. Редактор Д.А. Петраченко.

Сдано в набор 17.09.2022. Выход в свет 30.09.2022.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 11,63.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»
241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

