

УДК 621.318

doi: 10.20998/2079-3944.2019.1.01

*Е.И. БАЙДА, Б.В. КЛИМЕНКО, Ю.А. ЕЛАНСКИЙ, Я.Б. ФОРКУН***К РАСЧЕТУ ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩИХ СИЛ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА С ШАРИКОВЫМ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ И КАНАЛОМ РАЗГРУЗКИ**

Общее описание темы исследования. Рассматривается предлагаемая авторами возможность повышения быстродействия газораспределительного клапана с шариковым переключающим элементом и каналом разгрузки. **Актуальность темы.** Подобные клапаны широко применяются в различных отраслях, в частности, в аэрокосмической технике, где быстродействие является одной из важнейших характеристик. **Целью статьи** является расчетное обоснование предлагаемой возможности повышения быстродействия клапана, связанной с изменением конфигурации его газодинамической системы, на базе мультифизической модели происходящих в нем процессов, и проведение на основе разработанной модели расчета сил, противодействующих движению якоря электромагнита, на примере одного из клапанов, применяемых в ракетно-космической технике, в исходной и предлагаемой конструкциях клапана. **Метод исследований, научная новизна.** Расчет движения нагретого газового потока базируется на численном решении уравнений Навье – Стокса и уравнения теплового состояния стационарного газового потока с учетом сложных нелинейных зависимостей от температуры основных теплофизических характеристик сжатого газа – плотности, вязкости, теплоемкости и теплопроводности. **Практическая значимость и основные выводы.** Разработанная нелинейная мультифизическая модель течения газового потока позволяет рассчитывать силы, действующие на шариковый переключающий элемент газораспределительного клапана. Расчеты, проведенные на базе данной модели, показывают, что предложенная конфигурация газодинамической системы клапана позволяет существенно (до 30%) уменьшить силы, препятствующие движению якоря электромагнита и, таким образом, повысить быстродействие клапана.

Ключевые слова: газораспределительный электромагнитный клапан, шариковый ключевой элемент, газовый поток, мультифизическая модель, характеристика противодействующих сил.

*Є.І. БАЙДА, Б.В. КЛИМЕНКО, Ю.А. ЕЛАНСЬКИЙ, Я.Б. ФОРКУН***ДО РОЗРАХУНКУ ПРОТИДІЮЧИХ СИЛ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНОГО КЛАПАНА З КУЛЬКОВИМ ПЕРЕМІКАЛЬНИМ ЕЛЕМЕНТОМ І КАНАЛОМ РОЗВАНТАЖЕННЯ**

Загальний опис теми дослідження. Розглядається запропонована авторами можливість підвищення швидкодії газорозподільного клапана з кульковим перемикальним елементом і каналом розвантаження. **Актуальність теми.** Подібні клапани широко застосовуються в різних галузях, зокрема, в аерокосмічній техніці, де швидкодія є однією з найважливіших характеристик. **Метою статті** є розрахункове обґрунтування запропонованої можливості підвищення швидкодії клапана, пов'язаної зі зміною конфігурації його газодинамічної системи, на базі мультифізичної моделі процесів, що відбуваються в ньому і проведення на основі розробленої моделі розрахунку сил, які протидіють руху якоря електромагніта, на прикладі одного з клапанів, застосовуваних в ракетно-космічній техніці, у вихідній і запропонованій конструкціях клапана. **Метод досліджень, наукова новизна.** Розрахунок руху нагрітого газового потоку базується на чисельному рішенні рівнянь Нав'є - Стокса і рівняння теплового стану стаціонарного газового потоку з урахуванням складних нелінійних залежностей від температури основних теплофізичних характеристик стисненого газу - щільності, в'язкості, теплоємності і теплопровідності. **Практична значимість і основні висновки.** Розроблена нелінійна мультифізична модель течії газового потоку дозволяє розрахувати сили, що діють на кульковий перемикальний елемент газорозподільного клапана. Розрахунки, проведені на базі даної моделі, показують, що запропонована конфігурація газодинамічної системи клапана дозволяє істотно (до 30%) зменшити сили, що протидіють руху якоря електромагніта і, таким чином, підвищити швидкодію клапана.

Ключові слова: газорозподільний електромагнітний клапан, кульковий ключовий елемент, газовий потік, мультифізична модель, характеристика протидіючих сил.

*E.I. BAIDA, B.V. KLYMENKO, YU.A. YELANSKY, YA.B. FORKUN***TO CALCULATION OF COUNTERING FORCES IN GAS DISTRIBUTION VALVE WITH A BALL SWITCHING ELEMENT AND UNLOADING CHANNEL**

General description of the topic. The possibility of increasing the speed of a gas distribution valve with a ball switching element and a discharge channel, proposed by the authors, is considered. **Relevance of the topic.** Such valves are widely used in various industries, in particular, in aerospace engineering, where performance is one of the most important characteristics. **The aim of the article** is to calculate the rationale for the proposed possibility of increasing valve speed associated with changing the configuration of its gas-dynamic system, based on a multiphysical model of processes occurring in it, and based on the developed model for calculating forces opposing the movement of an electromagnet armature, used in rocket and space technology, in the original and proposed valve designs. **Research method, scientific novelty.** The calculation of the motion of a heated gas flow is based on the numerical solution of the Navier – Stokes equations and the equation of thermal state of a stationary gas flow, taking into account the complex non-linear dependencies on temperature of the main thermophysical characteristics of a compressed gas — density, viscosity, heat capacity and thermal conductivity. **Practical significance and main conclusions.** The developed nonlinear multiphysical model of gas flow allows one to calculate the forces acting on the ball switching element of the gas distribution valve. Calculations made on the basis of this model show that the proposed configuration of the valve's gas-dynamic system allows significantly (up to 30%) to reduce the forces that impede the movement of the armature of the electromagnet and, thus, to increase the valve speed.

Keywords: gas distribution solenoid valve, ball key element, gas flow, multiphysical model, characteristic of opposing forces.

Введение. Среди множества газораспределительных клапанов, которые широко используются в промышленности [1, 2], выделяются клапаны с шариковыми переключающими элементами. Применяются такие клапаны, в частности, в аэрокосмической технике [3 – 7], где одним из основных требований, предъявляемых к ним, является быстродействие. Время срабатывания этих клапанов, управляемых короткоходовыми быстродей-

ствующими электромагнитами, составляет единицы миллисекунд. Для корректного расчета приводного электромагнита необходимо в качестве исходных данных иметь значения противодействующей силы, которую должен преодолеть электромагнит, и которая определяет время срабатывания электромагнита, а вместе с ним – и клапана. Одним из наиболее эффективных способов повышения быстродействия отсечных клапа-

© Е.И. Байда, Б.В. Клименко, Ю.А. Еланский, Я.Б. Форкун, 2019

нов, перекрывающих подачу газа в устройство, управляемое клапаном при подаче питания на обмотку электромагнита, является применение каналов разгрузки, которые обеспечивают подачу входного давления на якорь электромагнита, частично уравнивая давление входного потока [8 - 12].

Особенностью расчета характеристик противодействующих сил клапана является то, что он работает при достаточно высоких давлениях – от нуля в режиме дренажа до 7,5 МПа (75 атм) в рабочем режиме и в широком диапазоне температур рабочего тела (газа) – от 300°C до 1200°C. Это обстоятельство усложняет проведение расчетов в силу сложных нелинейных зависимостей физических характеристик газов от давления и температуры. В данной статье в качестве рабочего тела рассматривается воздух, физические характеристики которого хорошо изучены, а соответствующие зависимости его теплофизических и газодинамических характеристик от температуры и давления представлены в доступных источниках.

Целью данной работы является расчетное обоснование предлагаемой возможности повышения быстродействия клапана, связанной с изменением конфигурации его газодинамической системы, на базе мультифизической модели происходящих в нем процессов, и проведение на основе разработанной модели расчета сил, противодействующих движению якоря электромагнита, на примере одного из клапанов, применяемых в ракетно-космической технике, в исходной (рис. 1) и предлагаемой конфигурациях газодинамической системы.

Исходная и предлагаемая конструкция клапана представлены на рис. 2. В исходной конструкции (рис. 2а) ось выпускного отверстия расположена выше оси переключающего шарика, прижатого к дренажному седлу, поэтому, как только электромагнит начинает перемещать шарик вниз, чтобы запереть выпускное отверстие, начинается также активный дренаж сжатого газа из канала разгрузки, а газ, поступающий из выпускного отверстия, не компенсирует дренаж вследствие малого сечения протока между шариком, имеющим диаметр 5,8 мм и цилиндром диаметром 6 мм, в котором шарик перемещается.

Дренаж газа из канала разгрузки приводит к уменьшению силы, действующей на разгрузочный шток, увеличению противодействующей силы и к торможению движения якоря, то есть к снижению быстродействия клапана.

В измененной конструкции (рис. 2б) ось выпускного отверстия предлагается располагать ниже оси переключающего шарика, прижатого к дренажному седлу, поэтому начало движения шарика вниз под действием силы, создаваемой электромагнитом, не должно приводить к резкому спаду давления газа в канале разгрузки, а значит – не должно приводить к снижению быстродействия. Ниже приводится расчетное обоснование данного решения.

Геометрические модели клапана для исходной и предлагаемой конструкций приведены на рис. 3. В исходном состоянии переключающий шарик находится в верхнем положении под действием давления сжатого газа и препятствует его выходу в атмосферу через дренажные отверстия. Сжатый газ через канал разгрузки давит на разгрузочный шток, а тот, в свою очередь, на якорь, уменьшая усилие, необходимое для перемещения шарика вниз до выпускного седла. При срабатывании

электромагнита, переключающий шарик перемещается из верхнего положения в нижнее положение, перекрывая выпускное отверстие и открывая путь газу к дренажным отверстиям, давление на выходе которых равно атмосферному давлению. Основным отличием исходной конструкции клапана от предлагаемой заключается в том, что во втором случае сжатый газ поступает в канал разгрузки из области, где давление равно входному давлению, что уравнивает силы давления газа на переключающий шарик на всем пути его движения. В исходном варианте конструкции канал разгрузки оказывается в зоне действия атмосферного давления дренажных отверстий, что увеличивает противодействующую силу движению шарика.

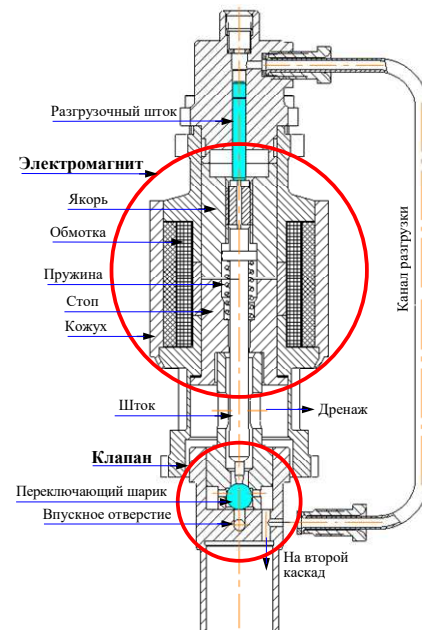


Рис. 1. Конструкция двухкаскадного электромагнитного газораспределительного клапана (исходная конструкция)

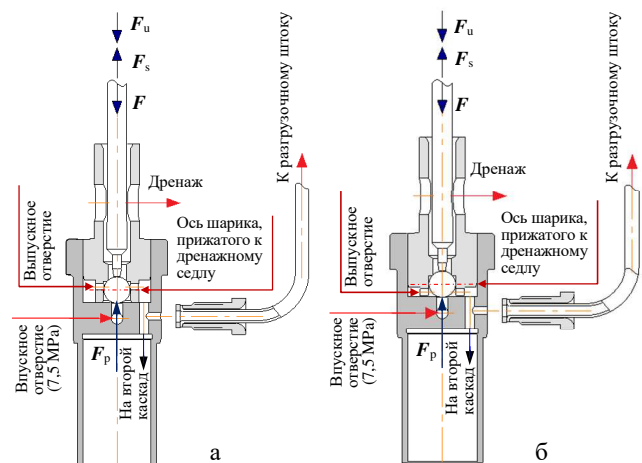


Рис. 2. Исходная и предлагаемая конструкция клапана F – сила, создаваемая электромагнитом; F_p – сила, создаваемая давлением газа на переключающий шарик со стороны выпускного отверстия; F_s – сила, создаваемая противодействующей пружиной; F_u – сила, создаваемая давлением газа на разгрузочный шток по каналу разгрузки

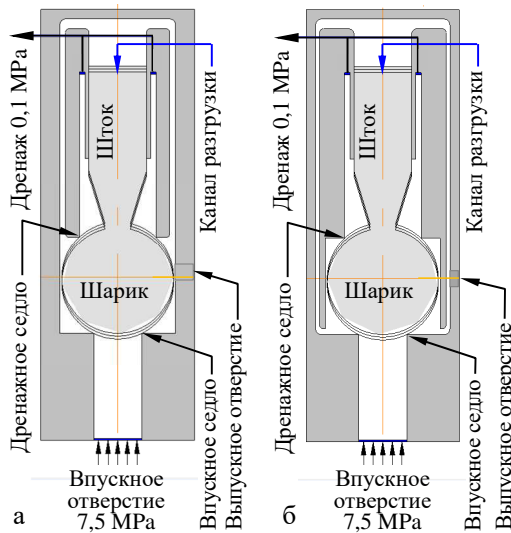


Рис. 3. Геометрические модели исходной (а) и предлагаемой (б) конструкции клапана

Задачей данной работы является расчет сил, действующих на переключающий шарик и противодействующих движению якоря электромагнита.

Модель движения нагретого газового потока базируется на уравнениях Навье – Стокса и уравнении теплового состояния стационарного газового потока без учета отдачи тепла в окружающую среду и элементы конструкции. Еще одним допущением является предположение о том, что при существующих давлениях, установившейся режим для газового потока наступает на порядок быстрее процесса перемещения подвижной системы клапана.

Система уравнений Навье – Стокса при отсутствии объемных сил имеет следующий вид в матричной форме [13]:

$$\rho \cdot (\vec{u} \cdot \nabla) \cdot \vec{u} = \nabla \cdot [-p \cdot I + \eta \cdot (\nabla \cdot \vec{u} + (\nabla \cdot \vec{u})^T) - \left(\frac{2}{3} \cdot \eta\right) \cdot (\nabla \cdot \vec{u}) \cdot I]; \quad (1)$$

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0; \rho = \rho(p, T); \eta = \eta(T), \quad (2)$$

где ρ – плотность газа; \vec{u} – матрица вектора скорости потока газа; p – давление; I – единичная матрица; η – вязкость газа; T – температура.

Уравнение (1) – это уравнение стационарного течения газового потока, а уравнение (2) представляет собой условие непрерывности потока.

Граничными условиями для уравнений (1) и (2) являются: нулевые значения скорости на стенках элементов, условие осевой симметрии – равенство нулю нормальной составляющей скорости, а также значения давления на входе (7,5 Мпа – давление сжатого газа) и выходе (0,1 Мпа – атмосферное давление).

Теплофизические характеристики газа (плотность и вязкость) существенно зависят от температуры, поэтому система уравнений (1, 2) должна быть дополнена уравнением теплопроводности для газа в стационарном режиме. При этом, поскольку газ является сжимаемой средой, в уравнении теплопроводности необходимо учесть работу давления – способность газа производить работу силой давления, которая существенно влияет на температуру среды. Соответствующее уравнение теплопроводности в этом случае имеет следующий вид [13]:

$$\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla \cdot T) = \rho \cdot C_p \cdot \vec{u} \cdot \nabla \cdot T + \left(\frac{T}{\rho}\right) \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_p \cdot (\vec{u} \cdot \nabla \cdot p) \quad (3)$$

где λ – удельная теплопроводность газа; C_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Граничными условиями для уравнения (3) являются: отсутствие теплоотдачи по границам канала течения газа, условия осевой симметрии, значение температуры на входе потока (во впускном отверстии), которое принимается равным – 1200 °С, а также условие открытой границы на выходе:

$$k \cdot \nabla \cdot T = \rho \cdot C_p \cdot \vec{u} \cdot T \quad (4)$$

Сложность решения системы (1 – 3) состоит в том, что все параметры газа являются сложными нелинейными функциями температуры и давления, поэтому корректное решение подобных задач может быть получено численными методами в мультифизических пакетах, имеющих обширные библиотеки характеристик материалов.

Сила, действующая на переключающий шарик (рис. 3), определяется как поверхностный интеграл от сил, вызванных давлением, вязкостью и скоростным напором:

$$\vec{F}_z = \int_S \left(-\vec{n}_z p + \vec{n}_r \eta \left(\frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) + 2\vec{n}_z \eta \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \cdot dS, \quad (5)$$

где \vec{n} – орт соответствующего направления.

Алгоритм расчета. Расчет сил, действующих на переключающий шарик, проводился в специальном программном пакете по алгоритму, показанному на рис. 4.

Результаты расчета сил, действующих на ключевой элемент клапана. Расчет сил, действующих на переключающий шарик, проводился для двух вариантов конструкции клапана – для геометрических моделей исходной и предлагаемой конструкций (рис.3) при различных значениях хода якоря электромагнита, изменяющегося в пределах от 0 до 0,3 мм. На рис. 5 показаны результаты расчета распределения давления в канале течения газа – от впускного до дренажного отверстия при значении хода 0,15 мм.

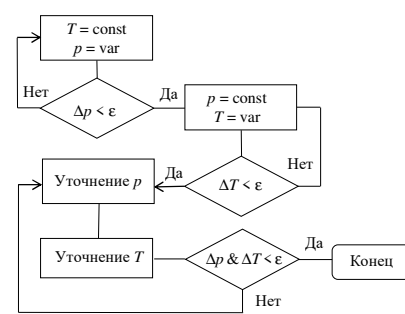


Рис. 4. Алгоритм расчёта

Как видим, давление в канале разгрузки (6 Мпа) в предлагаемой конструкции существенно больше, чем в исходной конструкции (4 Мпа), а это означает, что сила, противодействующая движению якоря электромагнита, будет существенно меньше, чем в исходной конструкции клапана.

Аналогичные расчеты были проведены при других значениях хода якоря в пределах от 0 до 0,3 мм. Результаты расчета силы по формуле (3) приведены в табл.1 и на рис. 6.

Рис. 5. Результаты расчета распределения давлений в исходном (а) и предлагаемом (б) вариантах конструкции клапана

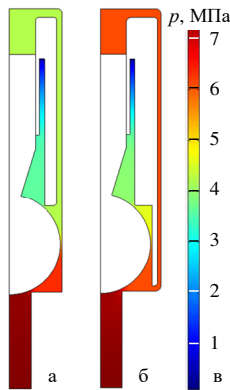


Таблица 1. Результаты расчета сил, противодействующих движению якоря электромагнита

Вариант конструкции клапана	Ход якоря, мм						
	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Исходный	41,8	51,9	59,2	62,4	58,1	49,7	37,3
Предлагаемый	41,2	38,6	44,5	36,3	38,4	43,9	37,3

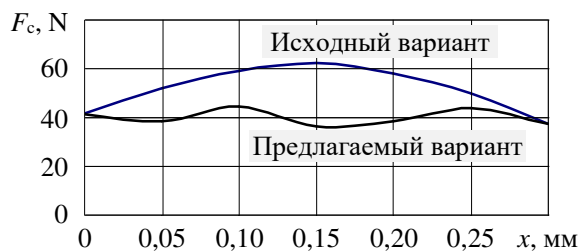


Рис. 6. Расчетные значения сил, создаваемых при воздействии сжатого газа на переключающий шарик клапана

Выводы.

1. Разработана нелинейная мультифизическая модель течения газового потока, на основании которой рассчитаны силы, действующие на переключающий шарик газораспределительного клапана, а также скоростные и тепловые параметры рабочей среды.

2. Предложенный вариант конструкции клапана с входом отверстия канала разгрузки, расположенным в области высокого давления, позволяет уменьшить значения противодействующих сил, препятствующих движению якоря электромагнита, что повышает быстродействие клапана.

Список літератури

1. Электромагнитные клапаны: https://www.italgaz.com.ua/equipment_pipe/klapan_elektromagnitnyj.html.
2. Нержавеющий электромагнитный клапан: <https://armakip.com.ua/index.php?id=176>.
3. Электромагнитные клапаны: https://hi-ip.com/industrial-automation/electromagnetic-valves/?gclid=CjwKCAiAkrTjBRAoEiwAXpf9CQ-clcPegmBKIut4RFOJfJJIWsrkFlypVBTVYn0Q1FZQvFBaw08ARoC9XEQAvD_BwE.
4. Газораспределительные клапаны управления летательным аппаратом: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2497034.html>.
5. Газораспределительные клапаны управления летательным аппаратом: <http://www.findpatent.ru/patent/246/2466320.html>.
6. Газораспределительные клапаны управления летательным аппаратом: <http://www.findpatent.ru/patent/245/2456494.html>.
7. Газораспределительный клапан: <https://edrid.ru/rid/217.015.c7bb.html>.
8. Газораспределительный клапан: <http://www.findpatent.ru/patent/214/2147350.html>.
9. А.Е. Зарянкин, С.А. Истомин, В.Е. Карашук, В.В. Носков, В.И. Черноштан. Новые угловой и клетковый проходной дроссельно-регулирующие клапаны: http://www.valve-industry.ru/pdf_site/36/36_nauka_zarjankin_reg-klapans.pdf.
10. Управляемый разгрузочный клапан: <https://hidravlik.com.ua/files/hr5224.pdf>.
11. Клапан ограничения давления с непрямым управлением: https://pkmoscow.ru/uploads/wys/File/RRS%2025802_1005.pdf.
12. Устройство электромагнитного клапана с принудительным управлением: https://pkmoscow.ru/uploads/wys/File/RRS%2025802_1005.pdf.
13. Френкель Я.И. Курс теоретической механики / Френкель Я.И. // – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с.

References (transliterated)

1. Jelektromagnitnye klapany: https://www.italgaz.com.ua/equipment_pipe/klapan_elektromagnitnyj.html.
2. Nerzhavėjushhij jelektromagnitnyj klapan.: <https://armakip.com.ua/index.php?id=176>.
3. Jelektromagnitnye klapany https://hi-ip.com/industrial-automation/electromagnetic-valves/?gclid=CjwKCAiAkrTjBRAoEiwAXpf9CQ-clcPegmBKIut4RFOJfJJIWsrkFlypVBTVYn0Q1FZQvFBaw08ARoC9XEQAvD_BwE.
4. Gazoraspredeľitel'nye klapany upravlenija letatel'nyj apparatom: <http://www.findpatent.ru/patent/249/2497034.html>.
5. Gazoraspredeľitel'nye klapany upravlenija letatel'nyj apparatom: <http://www.findpatent.ru/patent/246/2466320.html>.
6. Gazoraspredeľitel'nye klapany upravlenija letatel'nyj apparatom: <http://www.findpatent.ru/patent/245/2456494.html>.
7. Gazoraspredeľitel'nyj klapan: <https://edrid.ru/rid/217.015.c7bb.html>.
8. Gazoraspredeľitel'nyj klapan: <http://www.findpatent.ru/patent/214/2147350.html>.
9. A. E. Zarjankin, S. A. Istomin, V. E. Karashhuk, V. V. Noskov, V. I. Chernoshstan. Novye uglovoj i kletkovyj prohodnoj drossel'no-regulirujushhie klapany: http://www.valve-industry.ru/pdf_site/36/36_nauka_zarjankin_reg-klapans.pdf.
10. Upravljajemyj razgruzochnyj klapan: <https://hidravlik.com.ua/files/hr5224.pdf>.
11. Klapan ogranichenija davljenija s neprijamym upravleniem: https://pkmoscow.ru/uploads/wys/File/RRS%2025802_1005.pdf.
12. Ustrojstvo jelektromagnitnogo klapana s prinuditel'nyj upravleniem: https://pkmoscow.ru/uploads/wys/File/RRS%2025802_1005.pdf.
13. Frenkel' Ja.I. Kurs teoreticheskoj mehaniki. Leningrad: Tipografija "Krasnyj pechatnik", 1939. 386 p.

Поступила (received) 25.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Байда Євген Іванович (Байда Евгений Иванович, Bajda Yevgen) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0297-328X>; e-mail: baida.kpi@gmail.com

Клименко Борис Володимирович (Клименко Борис Владимирович, Klymenko Borys) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач, кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7860-4937>; e-mail: b.v.klymenko@gmail.com

Еланський Юрій Анатолійович (Еланский Юрий Анатольевич, Yelanskyi Yurii) – Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», начальник відділу, м. Дніпро, Україна; e-mail: yuyelans@gmail.com

Форкун Яна Борисівна (Форкун Яна Борисовна, Forkun Jana) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5718-1426>; e-mail: jana.forkun@gmsil.com