

DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-66-73

УДК 621.318.3

ББК 31.264.36

Е.Г. ВАСИЛЬЕВ, И.П. ИВАНОВ, А.В. МИХАЙЛОВ

ПРОЕКТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ С ПОЛЫМ СЕРДЕЧНИКОМ ОДНОПОЛЮСНОГО ГЕРМЕТИЧНОГО КОНТАКТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ключевые слова: герметичный контактор, броневой электромагнит, проектирование, электромагнитная сила, численное моделирование, проектные параметры, магнитная индукция.

Однополюсные герметичные контакторы постоянного тока производятся многими зарубежными электротехническими компаниями, а современные аналоги российского производства отсутствуют. Одной из проблем при создании таких контакторов является проектирование магнитной системы, которой и посвящена статья. **Целью исследования** является выявление оптимальных магнитодвижущих и электромагнитных сил броневого электромагнита с полым сердечником.

Материалы и методы. Исследования выполнены на основе магнитной системы контактора EV200 компании Kilovac с учетом возможных уточнений ее геометрических параметров. Расчет электромагнитной силы проведен путем численного моделирования методом конечных элементов в Comsol Multiphysics.

Результаты исследования. Описаны особенности конструкции магнитной системы, применяемой в контакторах фирм Gigavac и Kilovac. Проведены расчетные исследования электромагнитной силы при различных соотношениях геометрических параметров узла «якорь–сердечник», характеризующих отличительные особенности магнитной системы. Получены зависимости электромагнитной силы от конструктивных параметров броневого электромагнита с полым сердечником. По результатам распределения магнитной индукции выполнена оценка правильности выбора параметров магнитной системы.

Выводы. Предложенные подходы расчета электромагнитных и магнитодвижущих сил проверены сопоставлением результатов расчета с данными промышленного образца и могут быть использованы при разработке контакторов российского производства.

Введение. В однополюсных герметичных контакторах (ОГК), предлагаемых рядом зарубежных компаний, например Gigavac (США) [6], Kilovac (США) [7], TDK (Япония) [9], Kissling (Германия) [11], HONGFA (Китай) [8] и др., применяются магнитные системы (электромагниты) броневого типа как традиционного, так и оригинального исполнения. Некоторые вопросы исследования традиционных магнитных систем (МС) броневого типа, учитывающие особенности применения их в ОГК, рассмотрены в [5] и [12], а основы теории и проектирования этих МС широко освещены в технической литературе, например, в [2–4] и т.п.

МС наиболее распространенных ОГК (серий Gigavac [6], Kilovac [7] и др.) представляют собой электромагнит (ЭМ) броневого типа оригинальной конструкции с якорем, размещенным внутри сердечника. В имеющихся публикациях отсутствуют сведения по исследованию таких систем. Единственное упоминание встретилось в [10], где рассмотрен способ повышения удароустойчивости одного варианта исполнения МС такого типа.

Поэтому исследование подходов проектирования МС, которые могут быть использованы при разработке российских аналогов, является актуальной проблемой.

Целью настоящего исследования является выявление оптимальных проектных параметров, а именно магнитодвижущей и электромагнитной сил броневых электромагнита с полым сердечником простой и технологичной конструкции.

Материалы и методы исследования. Для пояснения особенностей конструкции и установления характерных соотношений геометрических параметров МС, влияющих на магнитодвижущую силу F и электромагнитную силу P_z , использована разработанная по технологиям реверс-инжиниринга 3D модель контактора EV200 компании Kilovac, предлагаемая по результатам предварительного анализа известных ОГК [6–9, 11 и др.] в качестве прототипа при разработке российского аналога. Магнитодвижущие силы (МДС) установлены с использованием традиционного метода графического сопоставления статических силовых характеристик МС (электромагнита). Расчетные исследования электромагнитной силы выполнены путем численного моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics. Оптимальность параметров оценена по результатам анализа графических зависимостей и степени насыщения материала МС.

Результаты исследований. Упрощенное изображение контактора с указанием основных конструктивных элементов приведено на рис. 1. Конструкция компактна, проста, без винтовых и защелкивающих соединений, что позволяет автоматизировать сборку.

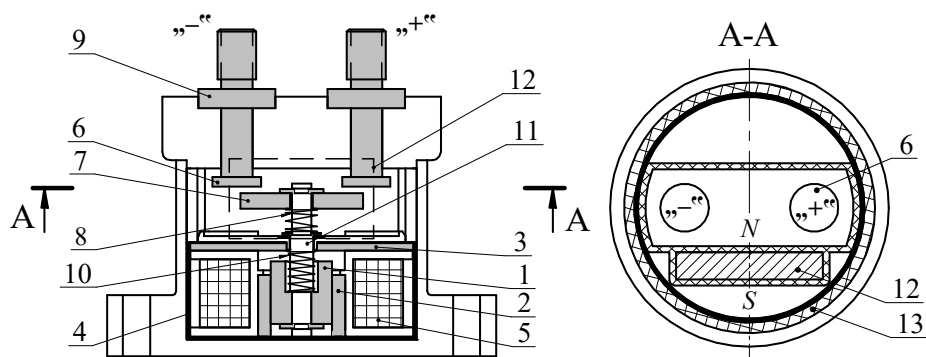


Рис. 1. Упрощенное изображение герметичного контактора, выполненное на основе 3D модели:

- 1 – якорь; 2 – полый сердечник; 3 – стоп (фланец); 4 – магнитопровод; 5 – катушка;
6 – неподвижные контакт-детали; 7 – мостик контактный; 8 – пружина контактная;
9 – выводы главной цепи; 10 – пружина возвратная; 11 – шток, соединяющий мостик с якорем; 12 – постоянный магнит для гашения дуги; 13 – корпус

Магнитную систему контактора составляют (рис. 2, а) цилиндрический якорь 1 со ступенчатым отверстием, полый сердечник 2, фланец 3 в виде диска с отверстием, магнитопровод 4 чашеобразной формы и обмотка управления 5.

В отличие от МС броневых типа с внутренним воротничком [2–4], который можно принять как конструктивный аналог, в рассматриваемой МС нерабочий торец якоря перемещается в пределах высоты сердечника, который является отдельным конструктивным элементом, а не составной частью

(воротничком) магнитопровода; причем в качестве магнитного полюса притяжения рабочего торца якоря служит часть фланца с отверстием (без какого-либо стопа). Другой характерной особенностью МС ОГК является комбинированный (ресурсосберегающий) режим управления, именуемый часто, например, в [4], как «форсированное» управление, который обеспечивается разными параметрами широтно-импульсной модуляции напряжения на обмотке при включении и удерживании электромагнита. Эти особенности, несомненно, влияют на параметры МС, что важно учесть при проектировании новых МС.

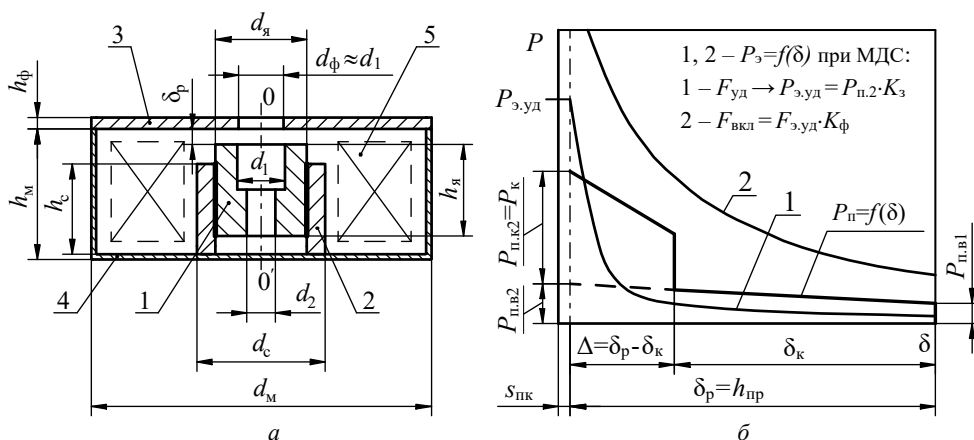


Рис. 2. Эскиз электромагнита (а) и его силовые характеристики $P_{пр} = f(\delta)$ и $P_э = f(\delta)$ (б):

$P_{п}$ – противодействующие силы пружин возврата $P_{п.в}$ и контактного нажатия $P_{п.к}$;

$P_э$ – электромагнитные силы при разных МДС обмотки F ;

1 – якорь; 2 – сердечник; 3 – стоп; 4 – магнитопровод; 5 – катушка

Общая компоновка и основные характеристики и параметры МС (геометрические размеры, рабочий зазор, действующие силы и т.п.) определяются в общем случае видом изделия, в котором используется эта МС, и степенью новизны разрабатываемого аналога. В отношении МС нового ОГК, разрабатываемого по технологиям реверс-инжиниринга, указанные показатели являются известными, и поэтому основная задача проектирования сводится к оптимизации МС с учетом результатов выбора МДС и выявленных зависимостей электромагнитной силы от особенностей этой МС, в первую очередь от соотношений геометрических параметров узла «якорь–сердечник» и новых требований (при необходимости).

Расчет магнитодвижущих сил (МДС) удобно вести относительно электромагнитной силы удерживания якоря, которая может быть определена с использованием графических построений (рис. 2, б) как

$$P_{э.уд} = K_з (P_{п.к} + P_{п.в.2}),$$

где $P_{п.к}$ – контактное нажатие; $P_{п.в.2}$ – сила возвратной пружины в сжатом состоянии; $K_з$ – коэффициент запаса, обеспечивающий надежное удерживание с учетом разброса параметров и внешних механических воздействий ($K_з = 1,2 \div 1,5$).

По результатам расчета МС при известном значении $P_{э,уд}$ находится МДС удерживания $F_{уд}$ и при заданном коэффициенте включения (форсировки) K_{ϕ} – значение МДС включения $F_{вкл}$:

$$F_{вкл} = K_{\phi} F_{уд}$$

Проверка правильности выбранных МДС может быть выполнена сопоставлением силовых характеристик МС. В качестве примера на рис. 2, б приведены противодействующие характеристики МС промышленного образца контактора и ее расчетные тяговые характеристики при $F_{уд}=130$ А и $F_{вкл}=660$ А.

Одной из основных задач проектирования рассматриваемой МС является определение оптимальных величин геометрических параметров элементов конструкции, определяющих ее отличие. Наиболее характерные из них (рис. 2, а): высота h_c и диаметр d_c полого сердечника 2; высота $h_я$ и диаметры $d_я$ и d_1 якоря 1; диаметр фланца d_{ϕ} ($d_{\phi} \approx d_1$) и технологический зазор δ_t между якорем 1 и полым сердечником 2. Параметры якоря 1 и сердечника 2 могут варьироваться в определенном диапазоне для конкретного типоразмера МС (для типоразмера контактора по номинальному току), которые удобно выразить при расчетах относительно габаритов МС: высоты h_m и диаметра d_m магнитопровода (в примерах расчета $h_m=18,5$ мм, $d_m=47,6$ мм). В качестве критерия оценки этих соотношений при исследованиях выбрана электромагнитная сила $P_э$.

На рис. 3 представлены результаты расчетов силы $P_э$ в зависимости от соотношений h_c/h_m при различных значениях соотношения $h_я/h_m$ для характерных режимов работы МС. Как следует из рис. 3, максимальные значения $P_э$ обеспечиваются при $(h_я/h_m) > 0,7$ и $(h_c/h_m) \approx (0,6 \div 0,7)$. Значения параметров, выделенные штрихпунктирными линиями, соответствуют данным образцам и являются близкими к оптимальным.

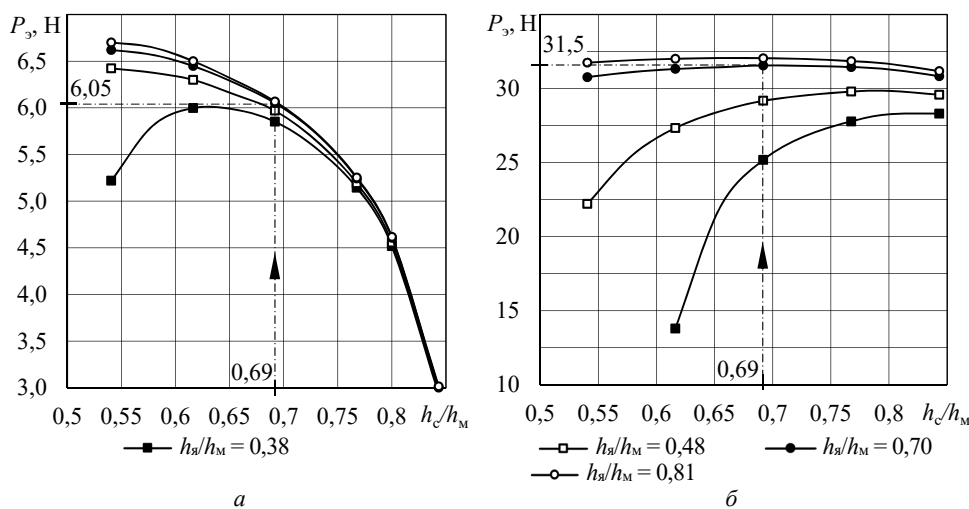


Рис. 3. Расчетные зависимости электромагнитной силы ($P_э$) от соотношения высот сердечника и магнитопровода (h_c/h_m) при разных соотношениях высот якоря и магнитопровода ($h_я/h_m$) в режиме включения (а) при $F = 660$ А, $\delta_p = 2,2$ мм и в режиме удерживания (б) при $F = 130$ А, $\delta_p = 0,05$ мм

На рис. 4, а приведены зависимости электромагнитной силы от соотношения диаметров сердечника и магнитопровода (МС) d_c/d_M . При расчетах значения других диаметров ($d_{я}$, $d_{ф}$, d_1 и d_2) установлены исходя из условия равенства площадей сечений сердечника и якоря при фиксированных значениях d_c . При МДС включения сила P_3 с изменением диаметра d_c практически не меняется, а при МДС удерживания изменяется не более чем на 6%. Также несущественно меняется сила P_3 с изменением технологического зазора δ_T в пределах, возможных от конструктивного выполнения этого узла (рис. 4, б). Наибольшее уменьшение P_3 с увеличением δ_T возможно в режиме удерживания якоря до 28%.

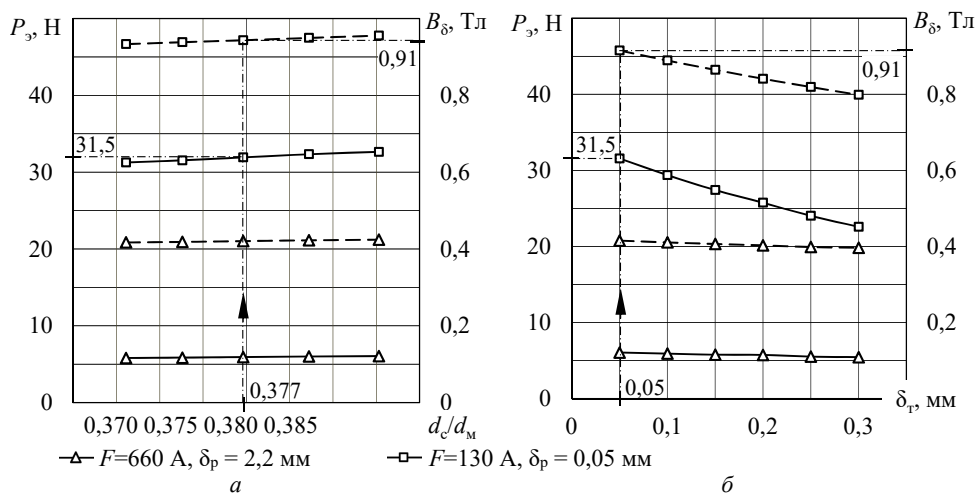


Рис. 4. Зависимости силы P_3 (сплошные линии) и индукции в зазоре B_{δ} (штриховые линии) от соотношения диаметров d_c/d_M (а) и от величины технологического зазора δ_T между якорем и сердечником (б) при разных МДС обмотки и рабочих зазорах

Оценка выбора геометрических размеров МС выполнена по результатам расчета магнитной индукции в сечениях магнитопроводящих деталей и в рабочем зазоре МС при разных значениях МДС обмотки, рабочего зазора и геометрических параметров узла «якорь–сердечник». На рис. 5 в фоновом изображении показано распределение индукции для наиболее характерных режимов работы МС. При притянудом якорю в начальный момент включения, который длится менее 100 мс, значительная часть МС находится в состоянии, близком к насыщению (рис. 5, б), и индукция составляет $B = (1,5 \div 2,4)$ Тл, а при срабатывании (рис. 5, а) и удерживании (рис. 5, в) индукция в основной части МС составляет порядка $B = (0,4 \div 0,95)$ Тл, что близко к граничному значению $B_{гр}$, при котором относительная магнитная проницаемость максимальная [1] (у применяемых в электромагнитах сталей марок 10895, 10850 и Ст.10 – $B_{гр} = 0,8 \div 0,95$ Тл.).

Магнитная индукция в рабочем зазоре B_{δ} , следовательно, на поверхности притянутых магнитных полюсов при разных соотношениях геометрических параметров системы близка к граничной $B_{гр}$. Все это свидетельствует о правильном выборе сечений магнитопроводящих деталей МС.

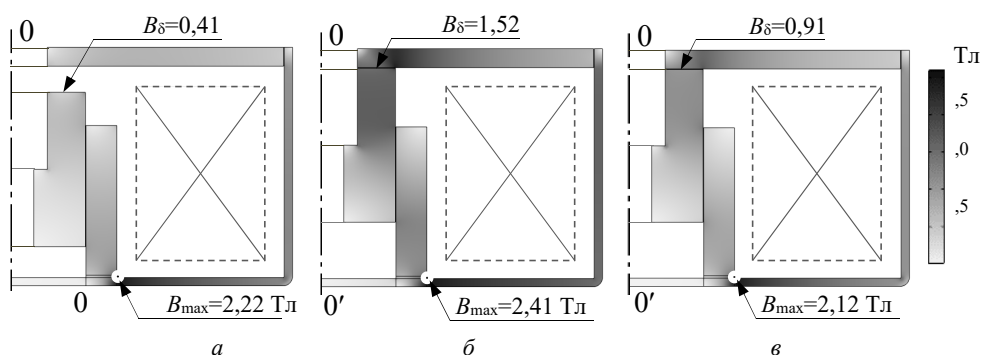


Рис. 5. Распределение магнитной индукции при разных режимах работы и параметрах системы:
 а – трогание якоря ($\delta_p = 2,2$ мм, $\delta_r = 0,05$ мм, $F = 660$ А);
 б – включенное состояние в режиме форсировки ($\delta_p = 0,05$ мм, $\delta_r = 0,05$ мм, $F = 660$ А);
 в – удерживание ($\delta_p = 0,05$ мм, $\delta_r = 0,05$ мм, $F = 130$ А)

Единственно, что следует отметить, – высокое значение индукции на стыке основания сердечника с магнитопроводом (на рис. 5 указаны максимальные расчетные значения в точке).

Интерес представляет степень влияния на работу МС сил трения между якорем и сердечником, возникающих из-за электромагнитных сил их взаимного притяжения вследствие возможных технологических несоосностей. Как показывают результаты экспериментов, такие силы в МС с минимальным технологическим зазором $\delta_r \approx 0,05$ мм составляют не более 13,3 г, это около 2,6% от силы пружины возврата. Поэтому при расчетах ими можно пренебречь.

Выводы. 1. Предложен подход определения магнитодвижущих сил обмотки управления броневой МС с полым сердечником, проектируемого по технологиям реверс-инжиниринга, исходя из режима удерживания якоря.

2. Получены расчетные зависимости электромагнитной силы от конструктивных параметров характерного для рассматриваемой МС узла «якорь–сердечник», по результатам которых установлены оптимальные значения этих параметров.

3. Выполнена оценка правильности выбора параметров МС сопоставлением расчетных значений магнитной индукции в МС с граничным значением индукции материала, при котором относительная магнитная проницаемость максимальна.

Литература

1. Васильев Е.Г., Иванов И.П., Самуилов Д.В., Свинцов Г.П. Обобщенные электромагнитные характеристики клапанных электромагнитов модульных контакторов // Вестник Чувашского университета. 2018. № 3. С. 33–43.
2. Лобов Б.Н., Медведев В.В., Чамлай С.В. О влиянии соотношений геометрических параметров электромагнита броневого типа с внутренним воротничком на развиваемые им электромагнитные усилия // Промышленная энергетика. 2023. № 1. С. 24–31. DOI: 10.34831/EP.2023.26.40.004.
3. Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974. 392 с.
4. Никитина О.А. Усовершенствование методик синтеза форсированных втяжных броневых электромагнитов постоянного напряжения: дис. канд. техн. науки. Чебоксары, 2017. 140 с.

5. Bo Zhang, Miao Zhang, Ting Dong. High-Fidelity Digital Twin Modeling Method for Contactor Operation Simulation. *13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*. Wuhan, China, 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/LDIA49489.2021.9505888.

6. Contactors Gigavac. Available at: <https://www.sensata.com/products/gigavac-power-contactors-fuses> (Accessed Date 2023, July 3).

7. Contactors Kilovac. Available at: <https://www.te.com/usa-en/products/brands/kilovac.html?tab=pdp-story> (Accessed Date 2023, July 3).

8. High Voltage DC Relay Hongfa. Available at: <https://www.hongfa.com/en/Product/List/NewEnergy> (Accessed Date 2023, July 3).

9. High-Voltage Contactors TDK. Available at: https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/hvc_presentation (Accessed Date 2023, July 3).

10. Naka Y., Shiba Y., Sakurai Y. “SVE135” Sealed High-Voltage Contactor Having High Over-current Withstand Capability. *Fuji Electric Review*, 2017, vol. 63, no. 3, pp. 174–179.

11. Power Relays Kissling. Available at: <https://www.te.com/usa-en/products/brands/kissling.html?tab=pdp-story> (Accessed Date 2023, July 3).

12. Sakata M., Takemoto T. Simulation Technology Supporting Development of Sealed High-Voltage Contactors. *Fuji Electric Review*, 2017, vol. 63, no 3, pp. 180–185.

ВАСИЛЬЕВ ЕВГЕНИЙ ГЕОРГИЕВИЧ – старший научный сотрудник, АО «ВНИИР-Прогресс», Россия, Чебоксары (veg@vniir.ru).

ИВАНОВ ИВАН ПЕТРОВИЧ – кандидат технических наук, главный научный сотрудник, АО «ВНИИР-Прогресс», Россия, Чебоксары (iivanov@vniir.ru).

МИХАЙЛОВ АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ – кандидат технических наук, руководитель направления, АО «ВНИИР-Прогресс»; и.о. заведующего кафедрой электрических и электронных аппаратов, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (avmihailov@vniir.ru).

Evgeniy G. VASILYEV, Ivan P. IVANOV, Alexey V. MIKHAILOV

**DESIGN PARAMETERS OF THE MAGNETIC SYSTEM
WITH A HOLLOW CORE**

OF A SINGLE-POLE HERMETICALLY SEALED DC CONTACTOR

Key words: hermetic contactor, armored electromagnet, design, electromagnetic force, numerical simulation, design parameters, magnetic induction.

Single-pole sealed DC contactors are produced by many foreign electrical engineering companies, and there are no modern analogues of Russian production. One of the problems when creating such contactors is the design of the magnetic system, which is the subject of the article.

The purpose of the study is to identify the optimal magnetomotive and electromagnetic forces of an armored electromagnet with a hollow core.

Materials and methods. The studies were carried out on the basis of the magnetic system of the EV200 contactor from Kilovac, taking into account possible refinements of its geometric parameters. The calculation of the electromagnetic force was carried out by numerical simulation by the finite element method in Comsol Multiphysics.

Research results. The design features of the magnetic system used in contactors from Gigavac and Kilovac are described. Calculation studies of the electromagnetic force were carried out for various ratios of the geometric parameters of the armature-core assembly, which characterize the distinctive features of the magnetic system. The dependences of the electromagnetic force on the design parameters of an armored electromagnet with a hollow core were obtained. Based on the results of the distribution of magnetic induction, an assessment of the correctness of the choice of parameters of the magnetic system was made.

Conclusions. The proposed approaches to calculating electromagnetic and magnetomotive forces are verified by comparing the calculation results with the data of an industrial design and can be used in the development of contactors manufactured in Russia.

References

1. Vasil'ev E.G., Ivanov I.P., Samuilov D.V., Svintsov G.P. *Obobshchennyye elektromagnitnye kharakteristiki klappannykh elektromagnitov modul'nykh kontaktorov* [Generalized electromagnetic characteristics of valve electromagnets of modular contactors]. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2018, no. 3, pp. 33–43.
2. Lobov B.N., Medvedev V.V., Chamlai S.V. *O vliyaniy sootnoshenii geometricheskikh parametrov elektromagnita bronevogo tipa s vnutrennim vorotnichkom na razvivaemye im elektromagnitnye usiliya* [On the effect of the ratios of geometric parameters of a shell-type (pot) electromagnet with an inner collar on the parameters developed electromagnetic forces]. *Promyshlennaya energetika*, 2023, no. 1, pp. 24–31. DOI: 10.34831/EP.2023.26.40.004.
3. Lyubchik M.A. *Optimal'noe proektirovanie silovykh elektromagnitnykh mekhanizmov* [Optimal design of power electromagnetic mechanisms]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 392 p.
4. Nikitina O.A. *Usovershenstvovanie metodik sinteza forsirovannykh vyzhnykh broneykh elektromagnitov postoyannogo napryazheniya: dis. ... kand. tehn. nauk* [Improvement of techniques of synthesis forced involved armored electromagnets of a constant voltage. Cand. Diss.]. Cheboksary, 2017, 140 p.
5. *Bo Zhang, Miao Zhang, Ting Dong*. High-Fidelity Digital Twin Modeling Method for Contactor Operation Simulation. *13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*. Wuhan, China, 2021, pp. 1–4. DOI: 10.1109/LDIA49489.2021.9505888.
6. Contactors Gigavac. Available at: <https://www.sensata.com/products/gigavac-power-contactors-fuses> (Accessed 3 July 2023).
7. Contactors Kilovac. Available at: <https://www.te.com/usa-en/products/brands/kilovac.html?tab=pdp-story> (Accessed 3 July 2023).
8. High Voltage DC Relay Hongfa. Available at: <https://www.hongfa.com/en/Product/List/NewEnergy> (Accessed 3 July 2023).
9. High-Voltage Contactors TDK. Available at: https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/hvc_presentation (Accessed 3 July 2023).
10. Naka Y., Shiba Y., Sakurai Y. “SVE135” Sealed High-Voltage Contactor Having High Over-current Withstand Capability. *Fuji Electric Review*, 2017, vol. 63, no. 3, pp. 174–179.
11. Power Relays Kissling. Available at: <https://www.te.com/usa-en/products/brands/kissling.html?tab=pdp-story> (Accessed 3 July 2023).
12. Sakata M., Takemoto T. Simulation Technology Supporting Development of Sealed High-Voltage Contactors. *Fuji Electric Review*, 2017, vol. 63, no 3, pp. 180–185.

EVGENIY G. VASILYEV – Senior Researcher, JSC «VNIIR-Progress», Russia, Cheboksary (veg@vniir.ru).

IVAN P. IVANOV – Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, JSC «VNIIR-Progress», Russia, Cheboksary (ipivanov@vniir.ru).

ALEXEY V. MIKHAILOV – Candidate of Technical Sciences, Head of Direction, JSC «VNIIR-Progress»; Acting Head of Electrical and Electronic Apparatus Department, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (avmikhailov@vniir.ru).

Формат цитирования: Васильев Е.Г., Иванов И.П., Михайлов А.В. Проектные параметры магнитной системы с полым сердечником однополюсного герметичного контактора постоянного тока // Вестник Чувашского университета. – 2023. – № 4. – С. 66–73. DOI: 10.47026/1810-1909-2023-4-66-73.