

М.А. ЛЕЛЮК, ОЛЕКСАНДР Г. СЕРЕДА, ОЛЕНА Г. СЕРЕДА, В.В. ЛИТВИНЕНКО

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ПРИВОДНИХ МЕХАНІЗМІВ ВАКУУМНИХ КОНТАКТОРІВ СЕРЕДНІХ НАПРУГ

Одним з головних елементів вакуумних контакторів середніх напруг є приводний механізм до складу якого входить електромагніт. В існуючих моделях контакторів використовуються два типи електромагнітів: моностабільні неполяризовані електромагніти з поворотною пружиною або бістабільні поляризовані без поворотної пружини. Виявлено, що використання поляризованих електромагнітів у поєднанні з мікропроцесорною системою керування розширює функціональні можливості контактора та дає змогу зменшити енергоспоживання електромагнітів, їх габаритні розміри та вагу, при цьому досягаючи значних сил утримання якоря. Розглянуто конструкції поляризованих електромагнітів, що були розроблені на кафедрі електричних апаратів НТУ «ХП» в продовж останніх років. Виявлено їх недоліки та запропоновано удосконалену конструкцію бістабільного поляризованого електромагніта, побудовано комп'ютерну модель контактора розроблену в пакеті КОМПАС-3D. Побудовано протидіючу характеристику механічної системи контактора, яка наведена до осі електромагніта та ходу якоря, визначено сили, які повинен створювати електромагніт у включеному та відключеному положеннях для надійного спрацьовування. Розроблено FEMM модель дослідного зразка бістабільного поляризованого електромагніта та проведено розрахунок у включеному і відключеному положеннях. Підтверджено можливість використання нової конструкції електромагніта у вакуумному контакторі середніх напруг.

Ключові слова: вакуумний контактор середньої напруги, електромагнітний привод, моностабільний поляризований електромагніт, бістабільний поляризований електромагніт, вакуумний переривник, постійний магніт, поворотна пружина.

M.A. LELIUK, Oleksandr H. SEREDA, Olena H. SEREDA, V.V. LYTVYNNENKO

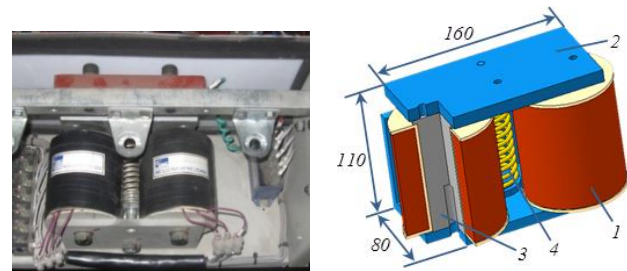
ANALYSIS OF DESIGNS OF DRIVE MECHANISMS OF MEDIUM VOLTAGE VACUUM CONTACTORS

One of the main elements of medium voltage vacuum contactors is the drive mechanism, which includes an electromagnet. In existing models of contactors, two types of electromagnets are used: monostable non-polarized electromagnets with a return spring or bistable polarized without a return spring. It was found that the use of polarized electromagnets in combination with a microprocessor control system expands the functionality of the contactor and makes it possible to reduce the energy consumption of the electromagnets, their overall dimensions and weight, while achieving significant armature holding forces. The designs of polarized electromagnets, which were developed at the Department of Electrical Apparatus in recent years, are considered. Their shortcomings were identified and a new design of a bistable polarized electromagnet was proposed, a computer model of the contactor developed in the KOMPAS-3D package was built. The counteracting characteristic of the mechanical system of the contactor, which is brought to the axis of the electromagnet and the stroke of the armature, is constructed, the forces that must be created by the electromagnet in the on and off position for reliable operation are determined. The FEMM model of the experimental sample of a bistable polarized electromagnet was developed and the calculation was carried out in the on and off positions. The possibility of using a new design of an electromagnet in a medium-voltage vacuum contactor has been confirmed.

Keywords: medium voltage vacuum contactor, electromagnetic drive, monostable polarized electromagnet, bistable polarized electromagnet, vacuum interrupter, permanent magnet, return spring.

Вступ. У вакуумних контакторах середніх напруг виконання комутаційних операцій головних контактів вакуумних переривників відбувається за рахунок дії приводного механізму. Головним елементом приводного механізму є електромагніт, який може бути моно або бістабільним, неполяризованим або поляризованим [1]. Причому, якщо магніт моностабільний, то до складу приводного механізму входить поворотна пружина, яка забезпечує відключення контактора. На рис. 1 показано конструкцію приводного механізму з моностабільним неполяризованим електромагнітом та поворотною пружиною, що встановлюється в серійних моделях вакуумних контакторів провідних іноземних виробників [2-4].

Для включення контактора на котушку електромагніта 1 подається постійна напруга і якорь 2 притягується до осердя 3 стискаючи поворотну пружину 4, при цьому головні контакти вакуумних переривників замикаються. Для підтримання контактів у замкненому положенні необхідно постійне живлення котушок електромагніта або використання механічної защіпки, що призводить до ускладнення конструкції.



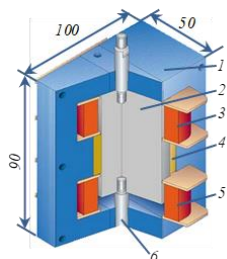
1 – котушка електромагніта; 2 – якорь; 3 – осердя;
4 – поворотна пружина

Рис. 1. Конструкція приводного механізму з моностабільним неполяризованим електромагнітом та поворотною пружиною

Що стосується приводного механізму з бістабільним електромагнітом, то встановлення поворотної пружини не потрібно. Включення або відключення контактора відбувається за рахунок подачі напруги на, відповідно, котушку включення 3 або відключення 5 електромагніта (рис. 2), а утримання в цих положеннях відбувається за рахунок дії постійних магнітів NdFeB 4 при знеструмлених котушках [5]. Якорь 2, через немагнітний шток 6, з'єднаний з приводним валом рух якого, в залежності від комутаційної операції, призводить до

замикання або розмикання головних контактів вакуумних переривників. Наявність постійних магнітів в конструкції електромагніта робить його поляризованим.

Використання електромагніта з котушкою включення та відключення, що розташовані одна над одною, збільшує габаритні розміри приводного механізму та контактора в цілому.



1 – шихтований магнітопровід; 2 – яркір; 3 – котушка включення; 4 – постійний магніт; 5 – котушка відключення; 6 – немагнітний шток

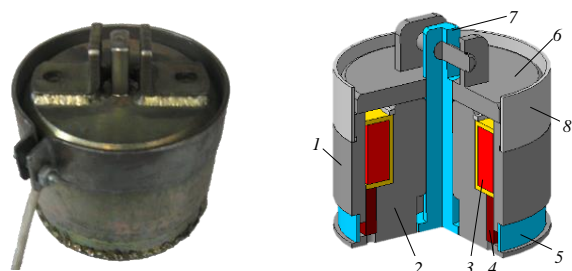
Рис. 2. Конструкція бістабільного поляризованого електромагніта

Розглянуті приводні механізми встановлено в існуючих моделях контакторів, що випускаються серійно. Причому, використання поляризованих електромагнітів дає змогу зменшити енергоспоживання електромагнітів, їх габаритні розміри та вагу, при цьому досягаючи значних сил утримання якоря. В якості систем керування можна використовувати мікропроцесорні системи, що значно розширює функціональні можливості, а саме дає можливість проводити моніторинг та діагностику роботи контактора, завдяки яким можливий контроль живлення кола керування, контроль роботи електромагніта по графікам зміни струмів при виконанні комутаційних операцій контактора, контроль розряду конденсатора, контроль положення приводного механізму, а також передача даних в диспетчерську систему, що робить систему керування готовою для впровадження технологій Smart Grid і інтелектуального електропостачання [6].

Мета роботи – аналіз конструкцій поляризованих електромагнітів для вакуумних контакторів середніх напруг та розробка нової конструкції бістабільного поляризованого електромагніта.

Поляризовані електромагніти для вакуумного контактора середніх напруг. На кафедрі електричних апаратів НТУ «ХП» в продовж останніх років ведуться розробки в напрямку удосконалення існуючих або проектування нових конструкцій поляризованих електромагнітів. В роботі [7] розглядається можливість використання моностабільного поляризованого електромагніта з поворотною пружиною (рис. 3).

Перше стабільне положення електромагніта у включеному стані, коли яркір 6 притиснутий до осердя 2. Друге стабільне положення, у відключеному стані, забезпечується тільки за рахунок дії поворотної пружини (на рис. 3 не показана).



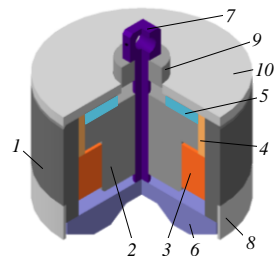
1 – корпус; 2 – осердя; 3 – котушка; 4 – постійний магніт; 5 – немагнітна вставка; 6 – яркір; 7 – немагнітний шток; 8 – шунт

Рис. 3. Конструкція моностабільного поляризованого електромагніта

Працює електромагніт наступним чином [7, 8]: при подачі напруги на котушку 3 з електролітичного конденсатора (магнітний потік, що при цьому індукується, повинен співпадати по напрямку з магнітним потоком постійного магніта 4) яркір 6 притягується до осердя 2, головні контакти вакуумних переривників замикаються. Після цього напруга з котушки 3 знімається і яркір 6 залишається притиснутим до осердя 2 за рахунок дії постійних магнітів 4, контактор знаходиться у включеному положенні. Для відключення контактора напруга на котушку 3 подається у зворотному напрямі, яркір розмагнічується і під дією поворотної пружини відходить від осердя 2 на задану відстань. На корпус електромагніта встановлено шунт 8 для збільшення сили притягування якоря 6 при виконанні операції включення [9].

Недоліком електромагніта можна вважати відскік якоря при відключенні контактора (шток зі сторони протилежній якорю має виступ для обмеження ходу), що може призвести до появи брязкоту головних контактів. Для усунення цього недоліку було розроблено конструкцію квазібістабільного поляризованого електромагніта.

Квазібістабільний поляризований електромагніт працює так само на включення та відключення контактора і так само для забезпечення другого стабільного положення електромагніта встановлено поворотну пружину, однак відмінність полягає в наявності якоря 9 (рис. 4) [10]. Він встановлений для чіткої фіксації якоря 6 у відключеному положенні і унеможливує відскік якоря при відключенні контактора.

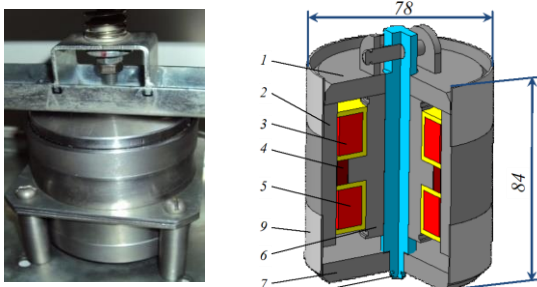


1 – корпус; 2 – осердя; 3 – котушка; 4 – постійний магніт; 5 – немагнітна вставка; 6 – яркір включення; 7 – немагнітний шток; 8 – шунт; 9 – яркір відключення; 10 – фланець

Рис. 4. Конструкція квазібістабільного поляризованого електромагніта

До недоліків такого електромагніта можна віднести необхідність встановлення поворотної пружини для відключення електромагніта, що призводить до необхідності збільшення тягової сили при включенні контактора та сили притискання якоря у включеному положенні. Для усунення цього недоліка було розроблено конструкцію бістабільного поляризованого електромагніта без поворотної пружини.

На рис. 5 показано конструкцію бістабільного поляризованого електромагніта. Його відмінність від бістабільного поляризованого електромагніта фірми АВВ (рис. 2) [5] полягає в тому, що корпус має циліндричну форму (рис. 5), фіксації осердя 6 до корпусу 2 відбувається за допомогою елементів кріплення у вигляді шпильок (на рис. 5 не показані), що виконані з немагнітного матеріалу, є два якорі включення 7 та відключення 1, які знаходяться ззовні корпусу 2 [11]. З обох боків корпусу 2 встановлені феромагнітні шпунти 9 для збільшення початкової сили притягування якоря.



1 – якор відключення; 2 – корпус; 3 – котушка відключення; 4 – постійний магніт; 5 – котушка включення; 6 – осердя; 7 – якор включення; 8 – немагнітний шток; 9 – шунт
Рис. 5. Конструкція бістабільного поляризованого електромагніта

Працює електромагніт наступним чином: при включенні контактора напруга подається на котушку включення 5, якор включення 7 притягується до осердя 6. Якор 7 механічно зв'язаний зі штоком 8 і через приводний вал з тягами рухомих головних контактів. Після притягування якоря 7 до осердя 6 головні контакти замикаються і подача напруги припиняється, а якор залишається притягнутим до осердя за рахунок дії постійних магнітів 4.

Відключення відбувається при подачі напруги на котушку відключення 3 і якор відключення 1 притягується до осердя 6. Якор залишається в цьому положенні за рахунок дії постійних магнітів 4.

У відповідності з кресленнями було розроблено FEMM модель дослідного зразка бістабільного поляризованого електромагніта в циліндричній системі координат (рис. 6) та отримано значення сили у включеному та відключеному положеннях, що становить 767 Н та 775 Н відповідно.

До недоліків електромагніта можна віднести складність його конструкції, а саме спосіб фіксації осердя 6 до корпусу 2 шпильками, що потребує точності при його центруванні; необхідність встановлення на корпусі додаткового кріплення для його фіксації в корпусі контактора, а також можливість потрапляння пилу

та бруду між його рухомими частинами, що може зменшити силу притискання у включеному та відключеному положеннях.

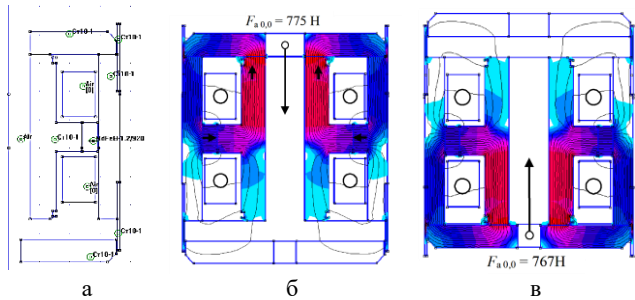
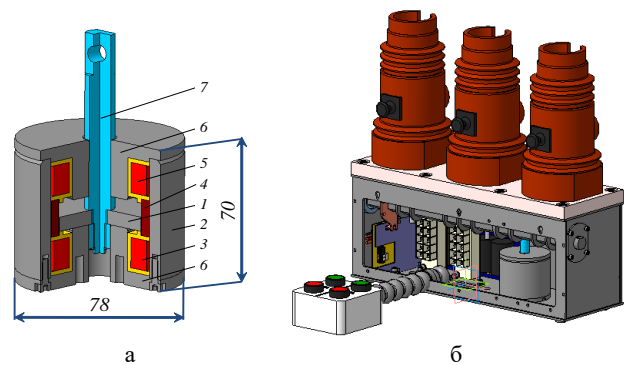


Рис. 6. FEMM модель дослідного зразка бістабільного поляризованого електромагніта у відключеному положенні (а) та розрахункові картини магнітного поля у відключеному (б) і включеному (в) положеннях при MPC Fm = 0

Для усунення цих недоліків було розроблено конструкцію бістабільного поляризованого електромагніта [12] та побудовано комп'ютерну модель контактора розроблену в пакеті КОМПАС-3D (рис. 7).



1 – якор; 2 – корпус; 3 – котушка відключення; 4 – постійний магніт; 5 – котушка включення; 6 – осердя; 7 – немагнітний шток

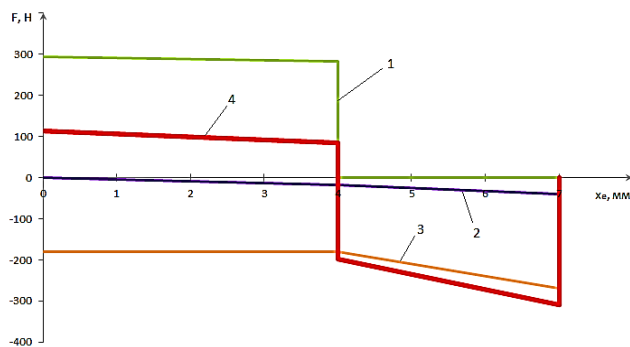
Рис. 7. Конструкція бістабільного поляризованого електромагніта з внутрішнім розташуванням якоря (а) та комп'ютерна модель розроблена в пакеті КОМПАС-3D (б)

Електромагніт має два стабільних положення, що забезпечуються постійними магнітами 4. Включення та відключення контактора відбувається так само, як і в попередній конструкції бістабільного поляризованого електромагніта. В залежності від того яка комутаційна операція відбувається, напруга подається або на котушку включення 5 або на котушку відключення 3.

Для механічної системи контактора було обрано характеристики контактної пружини (табл. 1), в залежності від вимог виробників вакуумних переривників [13] та побудована протидіюча характеристика механічної системи контактора, яка наведена до осі електромагніта та ходу якоря, що становить 7 мм (рис. 8).

Таблиця 1 – Характеристики контактної пружини дослідного зразка контактора

Вихідні дані	Контактна пружина
Зовнішній діаметр D , мм	22
Діаметр дроту (прутка) d , мм	2
Довжина пружини без навантаження l_f , мм	144
Робоче число витків n	14
Повне число витків n_1	16
Попереднє навантаження (вимкнене положення) $F_{до}$, Н	94
Проміжне навантаження (торкання контактів) F_c , Н	94
Робоче навантаження (увімкнене положення) F_r , Н	98
Максимальне навантаження F_{max} , Н	158
Жорсткість пружини c , Н/мм	1,4



1-3 – протидіючі характеристики: контактної пружини, блоку допоміжних контактів, вакуумного переривника; 4 – результуюча протидіюча характеристика механічної системи контактора

Рис. 8. Протидіюча характеристика механічної системи контактора, яка наведена до осі електромагніта та ходу якоря

Отримані результати розрахунку дозволяють визначити головні характеристики дослідного зразка електромагніта, а саме силу притиснення якоря до нерухомої частини магнітопроводу у включеному та відключеному положеннях, вона повинна бути не менше 114 та 310 Н відповідно.

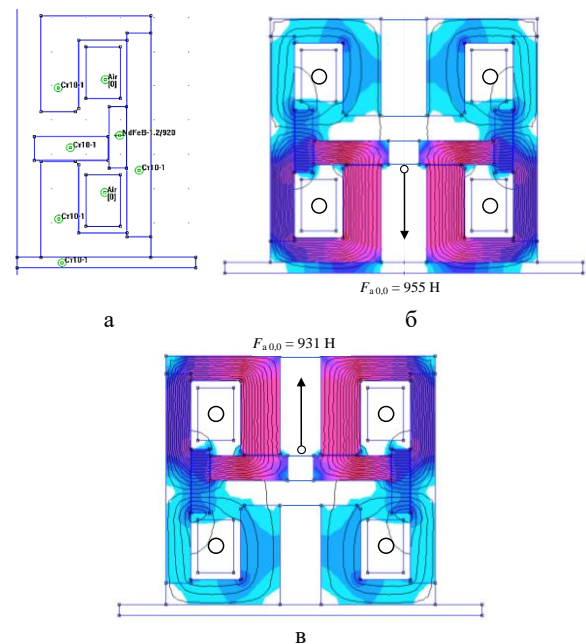
У відповідності з кресленнями було розроблено FEMM модель дослідного зразка бістабільного поляризованого електромагніта та проведено розрахунок у включеному і відключеному положеннях (рис. 9).

Сила притиснення якоря у відключеному та включеному положеннях становить 955 та 931 Н відповідно. Цього цілком достатньо для надійного спрацьовування електромагніта та утримання якоря в цих положеннях.

Висновки. 1. Проведено огляд існуючих конструкцій поляризованих електромагнітів для вакуумних контакторів середніх напруг. Розглянуто особливості їх роботи та виявлено недоліки.

2. Розглянуто удосконалену конструкцію бістабільного поляризованого електромагніта. За рахунок іншого конструктивного виконання осердя і котушок та розміщення якоря між котушками включення і відключення, вдалося зменшити масо-габаритні параметри електромагніта у порівнянні з існуючими конструкціями, збільшити силу притиснення якоря у включеному та відключеному положеннях, спростити

конструкцію та підвищити технологічність його збирання при виготовленні.

Рис. 9. FEMM модель дослідного зразка бістабільного поляризованого електромагніта у відключеному положенні (а) та розраховані картини магнітного поля у відключеному (б) і включеному (в) положеннях при MPC $F_m = 0$

3. Результати розрахунку сили притиснення якоря до нерухомої частини магнітопроводу у включеному та відключеному положеннях підтверджують можливість використання електромагніта у вакуумних контакторах середніх напруг.

4. Удосконалена конструкція бістабільного поляризованого електромагніта дає можливість його встановлення в корпус контактора без додаткових елементів кріплення.

Список літератури

1. Лелюк М. А. Структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів середньої напруги. *Вісник НТУ «ХП»*. 2016. № 32 (1204). С. 29-31.
2. Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
3. 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
4. Medium Voltage Distribution. CPX – CLX – CBX – CVX. Vacuum contactors up to 12 kV. Fixed and withdrawable range of contactors. Catalogue 2014. www.schneider-electric.com.
5. Medium voltage products V-Contact VSC. Вакуумные контакторы среднего напряжения. Technical catalogue 2015. www.abb.com.
6. Капун В. В., Козирський В. В. Smart Grid як інноваційна платформа розвитку електроенергетичних систем. *Енергетика та Електрифікація*. 2011. № 5. С. 13-18.
7. Клименко Б. В., Лелюк М. А., Бугайчук В. М., Форкун Я. Б. Електромагнітний актуатор для вакуумного контактора середніх напруг. *Вісник НТУ «ХП»*. Харків: НТУ «ХП». 2018. № 32 (1308). С. 27-33.
8. Бугайчук В. М., Клименко Б. В., Лелюк М. А. Патент 117000. Україна. *Електромагнітний привід*. 2017.
9. Чеплюк А. А., Вировец С. В. Анализ влияния ферромагнитных шунтов в рабочем зазоре на тяговые усилия в электромагните с однопозиционной магнитной защелкой. *Електротехніка і*

електромеханіка. 2008, №1. С. 15-17.

10. Бугайчук В. М., Клименко Б. В., Варшамова І. С., Гречко О. М. Патент 130401. Україна. *Електромагнітний привід*. 2018.
11. Бугайчук В. М., Клименко Б. В. Патент 49345. Україна. *Двопозиційний електромагнітний привід*. 2010.
12. Лелюк М. А. Патент 155302. Україна. *Бістабільний електромагніт*. 2024.
13. Vacuum interrupter for contactor. <http://www.ecvv.com/product/2145016.html>.
6. Kaplun V. V., Kozyrskiy V. V. Smart Grid yak innovatsiina platforma rozvytku elektroenerhetychnykh system. *Enerhetyka ta Elektrifikatsiia*, 2011, no 5, pp. 13-18.
7. Klymenko B. V., Leliuk M. A., Buhaichuk V. M., Forkun Ya. B. Elektromahnitnyi aktuator dlia vakuumnoho kontaktora srednikh napruh [An electromagnetic actuator for the medium voltage vacuum contactor]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI». 2018. no. 32 (1308). pp. 27-33.
8. Buhaichuk V. M., Klymenko B. V., Leliuk M. A. *Elektromahnitnyi pryvid*. Patent UA, no. 117000. 2017.
9. Chepelyuk A. A., Virovets S. V. Analiz vliyaniya ferromag-nitnykh shuntov v rabochem zazore na tyagovie usiliya v elektromagnite s odnopozitsionnoi magnitnoi zashchelkoi. *Yeletekhnika i yeletekhnika*. 2008, no. 1. pp. 15-17.
10. Buhaichuk V. M., Klymenko B. V., Varshamova I. S., Hrechko O. M. *Elektromahnitnyi pryvid*. Patent UA, no. 130401. 2018.
11. Buhaichuk V. M., Klymenko B. V. *Dvopozytsiyni elektromahnitnyi pryvid*. Patent UA, no. 49345. 2010.
12. Leliuk M. A. *Bistabilnyi elektromahnit*. Patent UA, no. 155302. 2024.
13. Vacuum interrupter for contactor. <http://www.ecvv.com/product/2145016.html>.

References (transliterated)

1. Leliuk M. A. Strukturna ta kinematychni skhemy vakuumnykh kontaktoriv srednoi napruhy [Structure and kinematic scheme of medium voltage vacuum contactors]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI». 2016. no. 32 (1204). pp. 29-31.
2. Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
3. 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
4. Medium Voltage Distribution. CPX – CLX – CBX – CVX. Vacuum contactors up to 12 kV. Fixed and withdrawable range of contactors. Catalogue 2014. www.schneider-electric.com.
5. Medium voltage products V-Contact VSC. Vakuumnie kontaktori srednego napryazheniya. Technical catalogue 2015. www.abb.com.

Надійшла (received) 20.05.2024

Відомості про авторів / About the authors

Лелюк Микола Анатолійович (Leliuk Mykola Anatoliyovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4223-517X>; e-mail: Lelyuk.nik@gmail.com.

Серєда Олександр Григорійович (Sereda Oleksandr Hryhoriyovych) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5243-3828>; e-mail: o.g.sereda@gmail.com.

Серєда Олена Геннадіївна (Sereda Olena Hennadiivna) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4658-9554>; e-mail: korolelgn@gmail.com.

Литвиненко Вікторія Володимирівна (Lytvynenko Victoriia Vladimirovna) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; e-mail: viktoria.lytvynenko@khi.edu.ua.