

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

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БІСТАБІЛЬНИМ ПОЛЯРИЗОВАНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТОМ ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА СЕРЕДНІХ НАПРУГ

Керування електромагнітними приводами вакуумних контакторів середніх напруг здійснюється електромеханічними або мікропроцесорними системами. Особливість використання вище згаданих систем керування залежить від конструктивних особливостей електромагніта, що входить до складу привода, а саме наявності в його конструкції висококоерцитивних постійних магнітів NdFeB. У статті розглянуто особливості роботи електромеханічної форсованої системи керування моностабільним неполяризованим електромагнітом та мікропроцесорної системи керування моно або бістабільним поляризованим електромагнітом. Розглянуті їх переваги та недоліки під час виконання операції включення та відключення контактора. На основі проведеного аналізу були визначені напрямки удосконалення мікропроцесорних систем керування бістабільними поляризованими електромагнітами шляхом заміни силових IGBT транзисторів малогабаритними інтерфейсними реле з однією перемикальною контактною групою та одним силовим IGBT транзистором. Розроблено мікропроцесорну гібридну систему керування бістабільним поляризованим електромагнітом та алгоритм її роботи при виконанні операції включення та відключення.

Ключові слова: вакуумний контактор, моностабільний електромагніт, бістабільний поляризований електромагніт, мікропроцесорні системи керування, гібридна система керування, інтерфейсні реле, постійні магніти, накопичувач енергії, енергоефективність.

М.А. LELIUK, OLEKSANDR H. SEREDA, OLENA H. SEREDA, V.V. LYTVYENKO

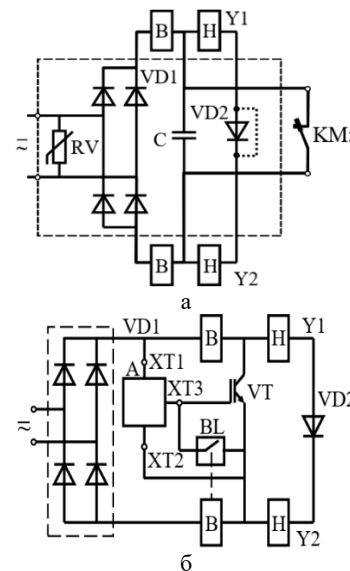
BISTABLE POLARIZED ELECTROMAGNET CONTROL SYSTEM FOR MEDIUM VOLTAGE VACUUM CONTACTOR

Electromagnetic drives of medium-voltage vacuum contactors are controlled by electromechanical or microprocessor systems. The peculiarity of using the above-mentioned control systems depends on the design features of the electromagnet included in the drive, namely the presence of high-coercivity permanent NdFeB magnets in its design. The article considers the features of the operation of an electromechanical forced control system for a monostable non-polarized electromagnet and a microprocessor control system for a mono or bistable polarized electromagnet. The advantages and disadvantages of control systems during the operation of switching on and off the contactor are considered. Based on the analysis, directions for improving microprocessor control systems for bistable polarized electromagnets were determined by replacing power IGBT transistors with small-sized interface relays with one switching contact group and one power IGBT transistor. A microprocessor hybrid control system for a bistable polarized electromagnet and an algorithm for its operation during the operation of switching on and off were developed.

Keywords: vacuum contactor, monostable electromagnet, bistable polarized electromagnet, microprocessor control systems, hybrid control system, interface relays, permanent magnet, energy storage, energy efficiency.

Вступ. У вакуумних контакторах середніх напруг керування електромагнітними приводами здійснюється електромеханічними або мікропроцесорними системами [1-8]. Все залежить від особливості конструкції електромагніта, який входить до складу привода. Якщо електромагніт моностабільний неполяризований з поворотною пружиною, то використовується електромеханічна форсована система керування (рис. 1, а). Особливість її роботи полягає в тому, що при включенні електромагніта напруга подається тільки на пускові обмотки *B*, а при спрацьовуванні електромагніта, коли яркі притиснуті до осердя, послідовно до них підключаються утримуючі обмотки *H*.

Головним недоліком даної системи керування є наявність допоміжного нормально-замкненого контакту керування *KM*., який при спрацьовуванні електромагніта підключає утримуючі обмотки *H* до пускових *B* і який через дію значних струмів індуктивного навантаження, з часом, піддається зносу, що може призвести до виходу з ладу електромагніта. В роботі [9] розглядається можливість його заміни на напівпровідниковий комутаційний елемент, який складається з таймера *A* та біполярного транзистора *VT* з ізолюваним затвором (рис. 1, б), що дало змогу підвищити надійність роботи системи керування.

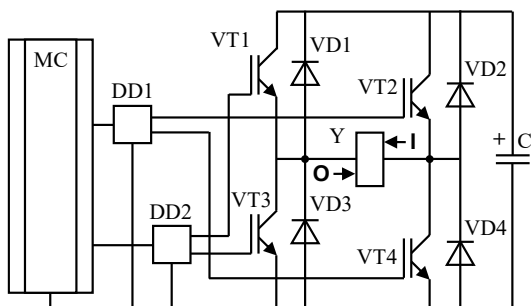


RV – варистор; *VD1* – діодний міст; *Y1*, *Y2* – котушки; *B* – пускові обмотки; *H* – утримуючі обмотки; *VD2* – діод; *C* – конденсатор; *KM* – допоміжний нормально-замкнений контакт керування; *VT* – біполярний транзистор з ізолюваним затвором; *A* – таймер з виводами живлення *XT1*, *XT2* та керуючим виводом *XT3*; *BL* – внутрішній замикальний контакт керування

Рис. 1. Схеми форсованого керування моностабільним неполяризованим електромагнітом з допоміжним нормально-замкнутим контактом (а) та напівпровідниковим комутаційним елементом (б)

© М.А. Лелюк, Олександр Г. Серед, Олена Г. Серед, В.В. Литвиненко, 2026

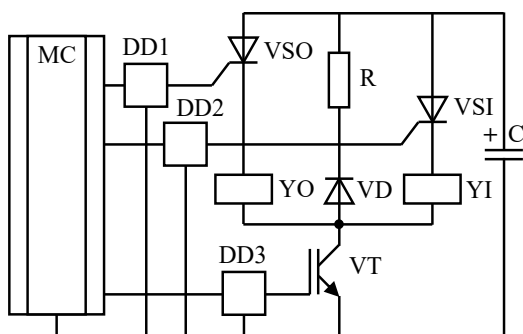
Керування поляризованими електромагнітами, до складу яких входять високоерцитивні постійні магніти NdFeB, відбувається мікропроцесорними системами [6, 10]. Використання таких електромагнітів, у поєднанні з мікропроцесорною системою керування, розширює функціональні можливості контактора. На рис. 2 показано мікропроцесорну систему керування моностабільним поляризованим електромагнітом з однією обмоткою Y , яка використовується при виконанні операції включення (I) та відключення (O). Залежно від операції, що виконується, обмотка Y підключається до певної діагоналі мосту, який складається з чотирьох силових IGBT транзисторів $VT1-VT4$. Керування транзисторами $VT1-VT4$ здійснюється мікроконтролером MC через драйвери $DD1$ та $DD2$.



MC – мікроконтролер; $DD1, DD2$ – драйвери; $VT1-VT4$ – силові IGBT транзистори; $VD-VD4$ – діоди; Y – обмотка; C – електролітичний конденсатор

Рис. 2. Мікропроцесорна схема керування моностабільним поляризованим електромагнітом

На рис. 3 показано мікропроцесорну схему керування бістабільним поляризованим електромагнітом з двома окремими обмотками включення (YI) та відключення (YO) [11].



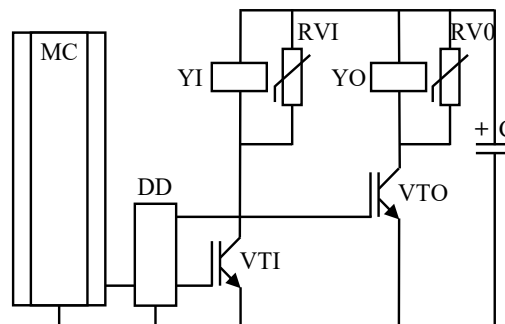
MC – мікроконтролер; $DD1, DD2, DD3$ – драйвери; $VT1$ – силовий IGBT транзистор; VSI, VSO – тиристри у колі включення та відключення; VD – діод; R – резистор; YI, YO – обмотки включення та відключення; C – електролітичний конденсатор

Рис. 3. Мікропроцесорна схема керування бістабільним поляризованим електромагнітом

Спрацьовування електромагніта відбувається при подачі керуючого сигналу мікроконтролером MC на силовий IGBT транзистор VT через драйвер $DD3$ та керуючого сигналу на тиристор VSI , через драйвер $DD2$, при виконанні операції включення електромагніта або

керуючого сигналу на тиристор VSO через драйвер $DD1$, при виконанні операції відключення електромагніта. Відповідна обмотка живиться від електролітичного конденсатора C (накопичував енергію).

У роботі [12] розглядається можливість заміни тиристорів та драйверів до них двома силовими IGBT транзисторами (рис. 4). Це обумовлено необхідністю спрощення системи керування та особливостями її роботи при включенні контактора на існуюче коротке замикання, що унеможливило його миттєве відключення без певної витримки часу і, як наслідок, може призвести до більш серйозної аварії [11].



MC – мікроконтролер; DD – драйвер; $VT1, VTO$ – силові IGBT транзистори у колі включення та відключення; YI, YO – обмотки включення та відключення; RVI, RVO – варистори у колі включення та відключення; C – електролітичний конденсатор

Рис. 4. Удосконалена мікропроцесорна схема керування бістабільним поляризованим електромагнітом

Для зменшення часу розмагнічування обмотки, при виконанні операції включення та відключення електромагніта, діодно-резистивний шунт замінено на варисторний RV .

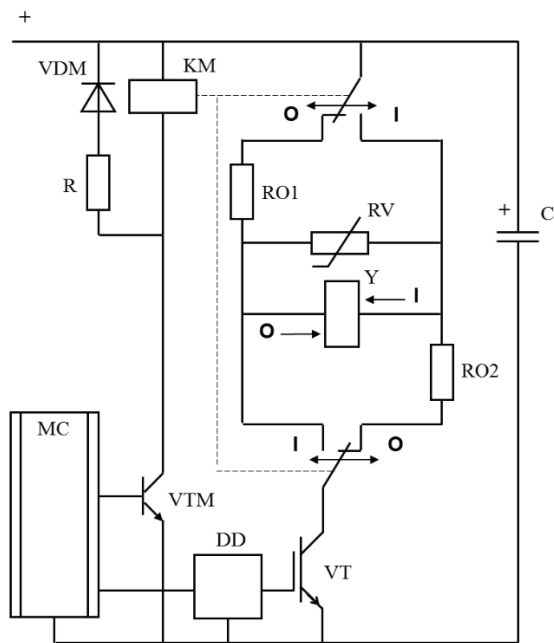
У розглянутих вище мікропроцесорних системах керування обмотками поляризованих електромагнітів здійснюється силовими транзисторами з драйверами до них, що підвищує вартість цих систем. Враховуючи це, актуальною задачею є розробка нових систем керування побудованих на можливості заміни напівпровідникових елементів механічними або, наприклад, створення гібридних систем керування, що поєднують переваги напівпровідникових та механічних елементів.

Мета роботи – розробка мікропроцесорної гібридної системи керування бістабільним поляризованим електромагнітом та алгоритму її роботи.

Мікропроцесорні гібридні системи керування поляризованими електромагнітами. Використання гібридних систем комутації електричних кіл, за рахунок поєднання переваг електромеханічних та напівпровідникових елементів, дало змогу підвищити надійність комутаційних апаратів [13-15]. Попередній аналіз відомих джерел інформації показав, що у вакуумних контакторах середніх напруг, що випускаються серійно, мікропроцесорні гібридні системи керування обмотками електромагнітів не використовуються, однак роботи в цьому напрямку проводяться як за кордоном так і в Україні. У роботі [16] розглядається можливість використання мікропроцесорної гібридної системи керування однією обмоткою моностабільного

поляризованого електромагніта (рис. 5). Комутаційними елементами, що забезпечують включення та відключення електромагніта, є один силовий IGBT транзистор VT та електро механічне інтерфейсне реле KM з двома перемикаючими контактними групами.

Залежно від операції, що виконується, обмотка Y , за рахунок спрацювання інтерфейсного реле KM та перемикачів його контактів, підключається до певного кола, що відповідає операції включення (I) або відключення (O) електромагніта. При цьому, силовий IGBT транзистор VT обов'язково повинен бути закритий до моменту, поки контакти інтерфейсного реле KM не замкнуться і не закінчиться їх брязкіт, інакше це призведе до появи на них електричної дуги, що у свою чергу, призведе до зменшення строку експлуатації реле.

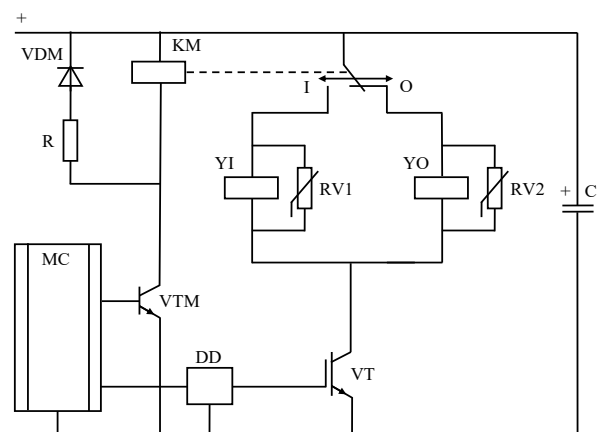


MC – мікроконтролер; DD – драйвер; VT – силовий IGBT транзистор; Y – обмотка електромагніта; VTM – біполярний транзистор; KM – обмотка інтерфейсного реле з двома перемикаючими контактними групами; VDM – діод; R , $R01$, $R02$ – резистори; RV – варистор; C – електролітичний конденсатор

Рис. 5. Мікропроцесорна гібридна схема керування моностабільним поляризованим електромагнітом

Слід зазначити, що у приводі контактора з моностабільним поляризованим електромагнітом включене положення, при знеструмленій обмотці, забезпечується висококоерцитивними постійними магнітами $NdFeB$, а відключене положення – поворотною пружиною. Це призводить до того, що при виконанні операції включення необхідно збільшувати тягову силу електромагніта та силу притискання якоря до осердя у включеному положенні (у порівнянні з бістабільним поляризованим електромагнітом де поворотна пружина відсутня, а включене та відключене положення, при знеструмлені обмотки, забезпечується висококоерцитивними постійними магнітами $NdFeB$) [17]. Враховуючи цю особливість, розглянемо мікропроцесорну гібридну систему керування бістабільним поляризованим

електромагнітом (рис. 6). Комутаційними елементами, що забезпечують включення та відключення електромагніта, є один силовий IGBT транзистор VT та електро механічне інтерфейсне реле KM з однією перемикаючою контактною групою. Алгоритм роботи системи керування при виконанні операції включення електромагніта повинен враховувати вище згадану послідовність спрацювання реле KM та відкриття транзистора VT . Тобто мікроконтролер MC , спочатку, подає керуючий сигнал на базу біполярного транзистора VTM для спрацювання інтерфейсного реле KM і, відповідно, замикання перемикального контакту з замикальним, а вже потім, після витримки певної паузи, мікроконтролер MC видає керуючий сигнал на затвор силового IGBT транзистора VT , останній відкривається і напруга конденсатора C подається на обмотку включення YI , якір електромагніта притискається до верхнього осердя і бістабільний поляризований електромагніт спрацює. Після спрацювання електромагніта, мікроконтролер MC знімає керуючий сигнал з затвору силового IGBT транзистора VT і, після витримки певної паузи, з бази біполярного транзистора VTM , перемикальний контакт інтерфейсного реле KM переходить у початкове положення і замикається з розмикальним контактом, електромагніт знаходиться у включеному положенні і готовий до виконання операції відключення.



MC – мікроконтролер; DD – драйвер; VT – силовий IGBT транзистор; YI , YO – обмотки включення та відключення; VTM – біполярний транзистор; KM – обмотка інтерфейсного реле з однією перемикаючою контактною групою; VDM – діод; R – резистор; $RV1$, $RV2$ – варистори у колі включення та відключення; C – електролітичний конденсатор

Рис. 6. Мікропроцесорна гібридна схема керування бістабільним поляризованим електромагнітом

Відключення електромагніта відбувається при подачі керуючого сигналу мікроконтролера MC на затвор силового IGBT транзистора VT , останній відкривається і напруга конденсатора C подається на обмотку відключення YO , якір електромагніта притискається до нижнього осердя і бістабільний поляризований електромагніт спрацює. Після спрацювання електромагніта, мікроконтролер MC знімає керуючий сигнал з затвору силового IGBT транзистора VT , електромагніт

знаходиться у відкритому положенні і готовий до виконання операції включення.

Розглянута мікропроцесорна гібридна система керування забезпечує надійне спрацювання бістабільного поляризованого електромагніта під час виконання операцій включення та відключення.

Висновки. 1. Розглянуто особливості роботи систем керування неполяризованими та поляризованими електромагнітами, що використовуються в якості привода у вакуумних контакторах середніх напруг. Виявлені їх переваги та недоліки.

2. Визначені напрямки удосконалення систем керування електромагнітами, а саме розробка нових або удосконалення існуючих мікропроцесорних систем керування побудованих на можливості заміни напівпровідникових елементів механічними або створенні гібридних систем керування, що поєднують переваги напівпровідникових та механічних елементів.

3. Розглянуті особливості роботи мікропроцесорної гібридної системи керування моностабільним поляризованим електромагнітом та алгоритм її роботи при виконанні операції включення та відключення.

4. Розроблено мікропроцесорну гібридну систему керування бістабільним поляризованим електромагнітом та алгоритм її роботи при виконанні операції включення та відключення. В якості комутаційних елементів, що забезпечують включення та відключення електромагніта, використовуються один силовий IGBT транзистор та електромеханічне інтерфейсне реле з однією перемикаючою контактною групою.

Список літератури

1. Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
2. 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
3. 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.
4. U-Series Вакуумный контактор среднего напряжения. www.hyundai-elec.com.
5. Tri-MEC LS Вакуумные контакторы среднего напряжения. Электрооборудование. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
6. Medium voltage products V-Contact VSC. Technical catalogue 2015. www.abb.com.
7. Клименко Б.В., Лелюк М.А., Бугайчук В.М., Форкун Я.Б. Электромагнитный актуатор для вакуумного контактора средних напруг. Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 32. – С. 27-33. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.05>.
8. Лелюк М.А. Структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів середньої напруги // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 32. – С. 29-31.
9. Король О. Г., Клименко Б.В., Єресько О.В. Дослідження перехідних процесів в новому напівпровідниковому пристрої форсованого керування моностабільним електромагнітом вакуумного контактора // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2019. – № 1. – С. 18-24. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.04>
10. Dullni E., Fink H., Reuber C. A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control. Режим доступу: https://library.e.abb.com/public/5e750b2ecc5b760ec1256ad4002d2c00/cired99_Nice_VM1.pdf
11. Клименко Б.В., Єресько А.В., Варшамова И.С., Лелюк Н.А. Исследование возможности применения интерфейсных реле в системах гибридной коммутации обмоток бистабильных актуаторов // Электротехника і Електромеханіка. – Харків: НТУ

"ХПІ". – 2016. – №1. – С. 21-25. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.1.04>

12. Бугайчук В.М., Варшамова И.С., Єресько О.В., Клименко Б.В., Форкун Я.Б. Пат. 132263, Україна. *Пристрій для керування електромагнітним приводом комутаційного апарата*. 2019.
13. Shukla Z.A., Demetriades G.D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies // IEEE Trans. Power Del., Vol. 30, No. 2, pp. 627-641, July 2014.
14. Chen Z. et al. Analysis and experiments for IGBT, IEGT, and IGCT in hybrid DC circuit breaker // IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 65, No. 4, pp. 2883-2892, Apr. 2018.
15. Сосков А.Г., Сабалаєва Н.О. Гібридні контактори низької напруги з покращеними техніко-економічними характеристиками: монографія. – Харків: ХНАМГ. – 2012. – 268 с.
16. Лелюк М.А., Клименко Б.В. Гібридна система керування моностабільним поляризованим приводом вакуумного контактора // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 25-30. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.05>
17. Лелюк М.А., Середа Олександр Г., Середа Олена Г., Литвиненко В.В. Аналіз конструкцій приводних механізмів вакуумних контакторів середніх напруг // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2024. – № 1. – С. 10-14. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.02>

References (transliterated)

1. Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
2. 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
3. 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.
4. U-Series Вакуумный контактор среднего напряжения. www.hyundai-elec.com.
5. Tri-MEC LS Вакуумные контакторы среднего напряжения. Электрооборудование. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
6. Medium voltage products V-Contact VSC. Technical catalogue 2015. www.abb.com.
7. Klymenko B.V., Leliuk M.A., Buhachuk V.M., Forkun Ya.B. Elektromagnitnyy aktuator dlia vakuumnogo kontaktora srednikh napruh. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Kharkiv: NTU «KhPI». 2018. No 32. Pp. 27-33. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2018.32.05>.
8. Leliuk M.A. Struktura ta kinematychni skhemy vakuumnykh kontaktoriv srednoi napruhy. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Kharkiv: NTU «KhPI». 2016. No 32. Pp. 29-31.
9. Korol O.H., Klymenko B.V., Yeresko O.V. Doslidzhennia perekhidnykh protsesiv v novomu napivprovodnykovomu prystroji forsovanooho keruvannia monostabilnym elektromagnitnom vakuumnooho kontaktora. Visnyk NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI". 2019. No 1. Pp. 18-24. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.04>
10. Dullni E., Fink H., Reuber C. A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control. Режим доступу: https://library.e.abb.com/public/5e750b2ecc5b760ec1256ad4002d2c00/cired99_Nice_VM1.pdf
11. Klimentko B.V., Eresko A.V., Varshamova I.S., Leliuk N.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya interfeysnyih rele v sistemah gibridnoy kommutatsii obmotok bistabilnyih aktuatorov. Elektrotehnika I Elektromehanika. Kharkiv: NTU "HPI". 2016. No 1. Pp. 21-25. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.1.04>
12. Buhachuk V.M., Varshamova I.S., Yeresko O.V.; Klymenko B.V., Forkun Ya.B. Prystrii dlia keruvannia elektromagnitnym pryvodom komutatsiinoho aparata. Patent Ukraine, no. 132263.
13. Shukla Z.A., Demetriades G.D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies. IEEE Trans. Power Del., 2014, Vol. 30, No. 2, Pp. 627-641.
14. Chen Z. et al. Analysis and experiments for IGBT, IEGT, and IGCT in hybrid DC circuit breaker. IEEE Trans. Ind. Electron., 2018, Vol. 65, No. 4, pp. 2883-2892.

- 15 Soskov A.G., Sabalaeva N.O. Hibrydni kontaktory nyzkoi napruhy z pokrashchenymy tekhniko-ekonomichnymy kharakterystykamy: monohrafiia [Hybrid contactors low voltage with improved technical and economic characteristics]. Kharkiv, National University of Urban Economy Publ., 2012. 268 p. (Ukr).
- 16 Leliuk M.A., Klymenko B.V. Hibrydna systema keruvannia monostabilnym poliaryzovanyim pryvodom vakuumnoho kontaktora. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Kharkiv: NTU «KhPI». 2019. No 1. Pp. 25-30. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2019.1.05>
- 17 Leliuk M.A., Sereda Oleksandr H., Sereda Olena H., Lytvynenko V.V. Analiz konstruktsii pryvodnykh mekhanizmv vakuumnykh kontaktoriv serednikh napruh. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Kharkiv: NTU «KhPI». 2024. No 1. Pp. 10-14. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.02>

Надійшла (Received) 09.04.2026

Прийнята (Accepted) 24.04.2026

Опублікована (Published) 30.04.2026

Відомості про авторів / About the authors

Лелюк Микола Анатолійович (Leliuk Mykola Anatoliyovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри електричні апарати, 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 електричні апарати, 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 електричні апарати, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4658-9554>; e-mail: korolelgn@gmail.com.

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