

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

## РОЗРАХУНОК ОБМОТУВАЛЬНИХ ДАНИХ КОТУШОК ВКЛЮЧЕННЯ ТА ВІДКЛЮЧЕННЯ БІСТАБІЛЬНОГО ПОЛЯРИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТА ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА СЕРЕДНІХ НАПРУГ

Вакуумні контактори середніх напруг складаються з комутаційного та привідного модулів. При розробці або удосконаленні конструкцій контакторів комутаційний модуль повинен відповідати вимогам, що висуваються їх виробниками. У відповідності з цими вимогами розробляється привідний модуль, який складається з механічної системи та електромагніта. Робота механічної системи контактора залежить від правильно обраних контактних пружин, а робота електромагніта – від тягових зусиль при виконанні комутаційних операцій. В роботі розглянуто конструкцію вакуумного контактора з бістабільним поляризованим електромагнітом з двома котушками включення та відключення. Побудовано протидіючу характеристику механічної системи контактора та визначено сили, що діють на електромагніт у включеному та відключеному положеннях контактних пружин. Розроблено FEEM модель бістабільного поляризованого електромагніта та визначено мінімальне значення МРС обмоток включення та відключення. Побудовано результуючу тягову характеристику бістабільного поляризованого електромагніта при мінімальному значенні МРС обмоток включення та відключення і робочому зазорі. Визначено, що при виконанні комутаційної операції та використанні спільно обмоток включення і відключення вдалося зменшити МРС спрацьовування електромагніта. Проведено розрахунок обмотувальних даних котушок включення та відключення при різних значеннях номінального діаметру проводу та напруги мережі живлення і, у відповідності з цим, визначено мінімальне значення МРС обмоток.

**Ключові слова:** вакуумний контактор, комутаційний модуль, привідний модуль, вакуумний переривник, механічна система, контактна пружина, бістабільний поляризований електромагніт, постійний магніт.

*M.A. LEIUK, OLEKSANDR H. SEREDA, OLENA H. SEREDA, V.V. LYTVYENKO*

## CALCULATION OF THE WINDING DATA OF THE ON AND OFF COILS OF A BISTABLE POLARIZED ELECTROMAGNET FOR A VACUUM MEDIUM VOLTAGE CONTACTOR

Medium voltage vacuum contactors consist of switching and drive modules. When developing or improving the designs of contactors, the switching module must meet the requirements set forth by their manufacturers. In accordance with these requirements, a drive module is being developed, which consists of a mechanical system and an electromagnet. The operation of the mechanical system of the contactor depends on correctly selected contact springs, and the operation of the electromagnet depends on traction forces during switching operations. The design of a vacuum contactor with a bistable polarized electromagnet with two ON and OFF coils is considered in the article. The counteracting characteristic of the mechanical system of the contactor is constructed and the forces acting on the electromagnet in the ON and OFF positions of the contactor are determined. The FEMM model of a bistable polarized electromagnet was developed and the minimum MMF value of the ON and OFF windings was determined. The resulting traction characteristic of a bistable polarized electromagnet is constructed at the minimum MMF value of the ON and OFF winding and the working gap. It was determined that when performing the switching operation and using the ON and OFF winding at the same time, it was possible to reduce the MMF of the electromagnet operation. The winding data of the ON and OFF coils were calculated at different values of the nominal diameter of the wire and the voltage of the power supply network, and, in accordance with this, the minimum value of the MMF of the windings was determined.

**Keywords:** vacuum contactor, switching module, drive module, vacuum interrupter, mechanical system, contact spring, bistable polarized electromagnet, permanent magnet.

**Вступ.** Надійна робота вакуумних комутаційних апаратів залежить від правильно спроектованих комутаційного та привідного модулів, це стосується як викиачів так і контакторів [1]. Комутаційний модуль складається з вакуумних переривників, безаварійна робота яких залежить від дотримання вимог виробників вакуумних переривників, щодо одночасності замикання головних контактів, кількості та тривалості їх брязкоту під час виконання операції включення, швидкості замикання та розмикання контактів, сили підтягання контактів у включеному положенні [2]. Виконання цих вимог залежить від спроектованого привідного модулю, а саме механічної системи контактора та електромагніта (рис. 1) [3]. Причому робота механічної системи контактора залежить від правильно обраних контактних пружин, а робота електромагніта – від тягових зусиль при виконанні операції включення та відключення контактора.

Розрахунок тягових зусиль проводиться при різних значеннях робочого зазору між якорем та осердям електромагніта для визначення значення магніторушійної сили (МРС) котушки, яка необхідна для виконання операції включення та відключення контактора.

У вакуумному контакторі встановлено

бістабільний поляризований електромагніт з двома котушками, включення та відключення (рис. 1) [4].

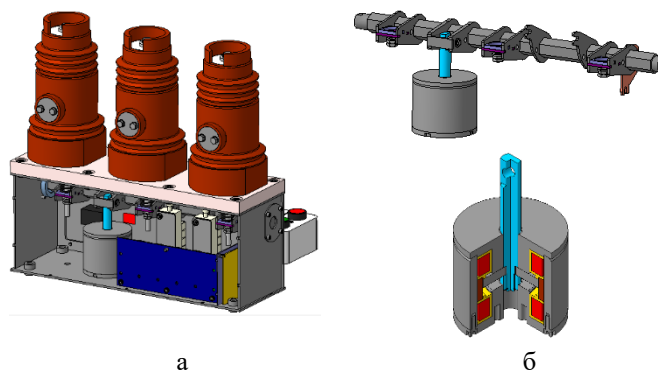
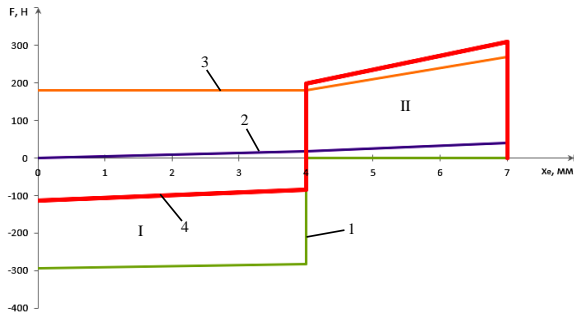


Рис. 1. Комп'ютерна модель вакуумного контактора середніх напруг розроблена в пакеті КОМПАС-3D (а) та привідний модуль з бістабільним поляризованим електромагнітом (б)

Особливість розрахунку такого електромагніта полягає в тому, що необхідно визначити мінімальне значення МРС котушок включення та відключення при якому, в залежності від комутаційної операції, буде відбуватися спрацьовування контактора. Для виконання

цієї умови побудовано протидіючу характеристику механічної системи контактора (рис. 2) [3], з якої видно, що характеристика має дві ділянки, перша ділянка відповідає замкненому стану головних контактів (від 0 до 4 мм), друга ділянка – розімкненому стану головних контактів (від 4 до 7 мм).



$x_e = 7$  – головні контакти розімкнені, відключене положення контактора;  $x_e = 4$  – замикання або розмикання головних контактів в залежності від операції, що виконується;  $x_e = 0$  – головні контакти замкнені, включене положення контактора; 1-3 – протидіючі характеристики: контактної пружини, блоку допоміжних контактів, вакуумного переривника; 4 – результуюча протидіюча характеристика механічної системи контактора

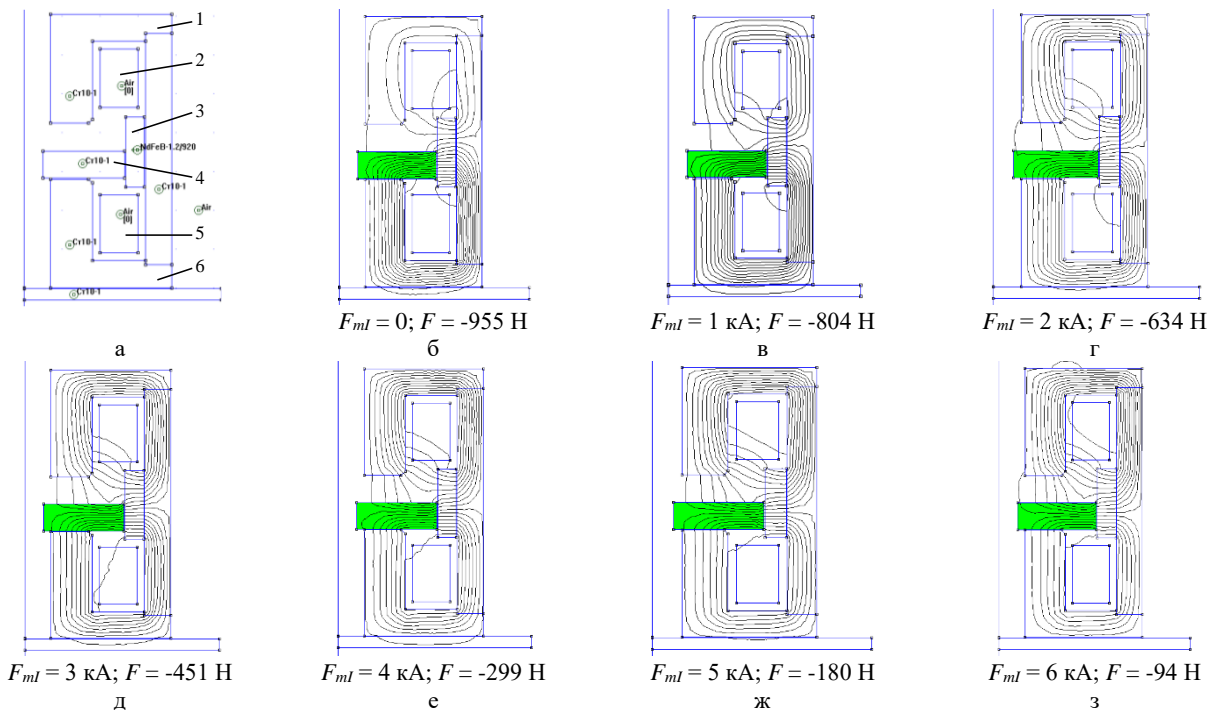
Рис. 2. Протидіюча характеристика механічної системи контактора, яка наведена до осі бістабільного поляризованого електромагніта та ходу якоря

В залежності від того в якому стані знаходиться контактор, включеному або відключеному, сили, що створюються механічною системою діють по різному.

Наприклад, коли контактор знаходиться у відключеному положенні і головні контакти розімкнені, сила, що створюється механічною системою, діє у напрямку включення контактора (рис. 2, ділянка II). Якщо контактор знаходиться у включеному положенні і головні контакти замкнені, сила, що створюється механічною системою, діє у напрямку відключення контактора (рис. 2, ділянка I). Цю особливість необхідно враховувати при визначенні мінімального значення МРС котушок включення та відключення.

**Мета роботи** – визначення мінімального значення МРС обмоток включення та відключення при яких буде відбуватися надійне спрацьовування вакуумного контактора.

**Визначення магніторушійної сили обмотки включення бістабільного поляризованого електромагніта.** Включення контактора відбувається при подачі струму на обмотку включення електромагніта, при цьому якір з нижнього положення переміщується у верхнє і за допомогою механічної системи головні контакти замикаються. Значення цього струму залежить від обмотувальних даних котушки та значення її МРС і повинно бути таким, щоб тягова характеристика електромагніта на всьому проміжку руху якоря мала позитивне значення і при цьому сила притягування якоря до нижнього осердя зменшилась до значення при якому якір почав би рух у верхнє положення. Для визначення мінімального значення МРС обмотки включення, при якому якір переміщується з нижнього положення у верхнє, розроблено FEEM модель бістабільного поляризованого електромагніта (рис. 3, а) [5].



1 – верхнє осердя; 2 – обмотка включення; 3 – постійний магніт; 4 – якір; 5 – обмотка відключення; 6 – нижнє осердя  
Рис. 3. FEEM модель бістабільного поляризованого електромагніта (а) та розрахункові картини магнітного поля при різних значеннях МРС обмотки включення (б-з)

Слід враховувати, що у відключеному положенні механічна система контактора створює силу 310 Н

(рис. 2,  $x_e = 7$  мм), що діє у напрямку включення контактора, але її недостатньо для його спрацьовування,

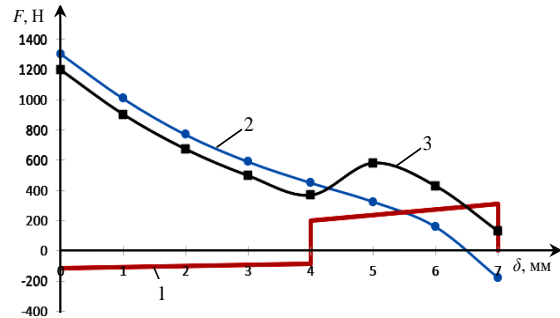
так як сила притягування якоря до нижнього осердя в цьому положенні становить -955 Н (рис. 3, б). Знак мінус в розрахунках вказує на те, що сила притягування якоря діє по напрямку вниз. На рис. 3, в-з показано залежність сили притягування якоря від MPC обмотки при виконанні операції включення контактора. При значенні MPC обмотки  $F_{m1} = 5$  кА (рис. 3, ж) сила притягування якоря до нижнього осердя становить -180 Н і цієї сили буде не достатньо для утримання якоря (враховуючи дію сили механічної системи контактора 310 Н) і якір почне рух у верхнє положення.

Для побудови тягової характеристики електромагніта при виконанні операції включення контактора необхідно визначити силу притягування якоря  $F$  до верхнього осердя при мінімальному значенні MPC обмотки включення  $F_{m1} = 5$  кА та різних значеннях робочого зазору  $\delta$ . Результати розрахунку сили притягування якоря  $F$  приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Залежність сили притягування якоря до верхнього осердя при мінімальному значенні MPC обмотки включення  $F_{m1} = 5$  кА та робочому зазорі  $\delta$

$\delta$ , мм	7	6	5	4	3	2	1	0
$F$ , Н	-180	159	326	452	592	772	1012	1310

За результатами табл. 1 побудовано графік тягової характеристики електромагніта (рис. 4). З урахуванням сил, що створюються механічною системою контактора, побудовано результуючу тягову характеристику електромагніта при виконанні операції включення, яка на всьому проміжку руху якоря має позитивне значення, що свідчить про надійне спрацювання електромагніта і включення контактора.



1 – протидіюча характеристика механічної системи контактора; 2 – тягова характеристика електромагніта; 3 – результуюча тягова характеристика електромагніта  
Рис. 4. Протидіюча характеристика механічної системи контактора та результуюча тягова характеристика бістабільного поляризованого електромагніта при MPC обмотки включення  $F_{m1} = 5$  кА та робочому зазорі  $\delta$

**Визначення магніторушійної сили обмотки відключення бістабільного поляризованого електромагніта.** Відключення контактора відбувається при подачі струму на обмотку відключення електромагніта, при цьому якір з верхнього положення переміщується у нижнє і за допомогою механічної системи головні контакти розмикаються. На рис. 5 показано залежність сили притягування якоря від MPC обмотки при виконанні операції відключення контактора.

У включеному положенні механічна система контактора створює силу -114 Н (рис. 2,  $x_e = 0$ ), що діє у напрямку відключення контактора, але її недостатньо для його спрацювання, так як сила притягування якоря до верхнього осердя становить 931 Н (рис. 5, а).

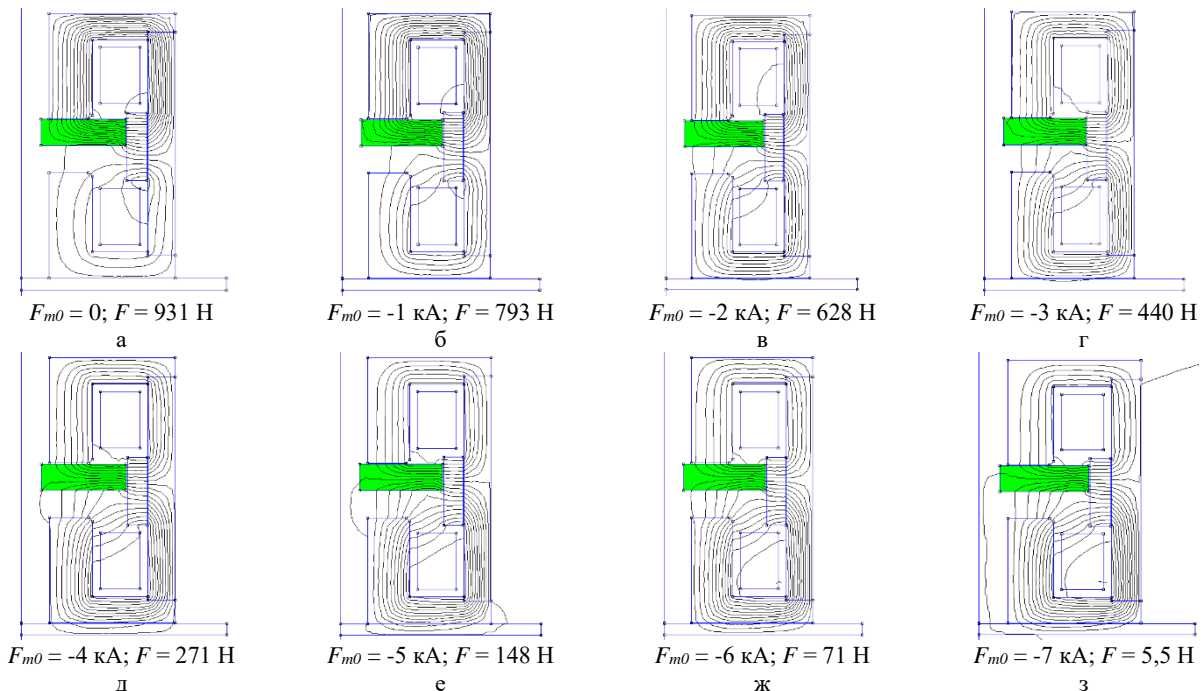


Рис. 5. Розрахункові картини магнітного поля при різних значеннях MPC обмотки відключення

На рис. 5, б-з показано залежність сили притягування якоря від MPC обмотки при виконанні операції відключення контактора. При значенні MPC обмотки

$F_{m0} = -7$  кА (рис. 5, з) сила притягування якоря до верхнього осердя становить 5,5 Н і цієї сили вже буде не достатньо для утримання якоря (враховуючи дію сили

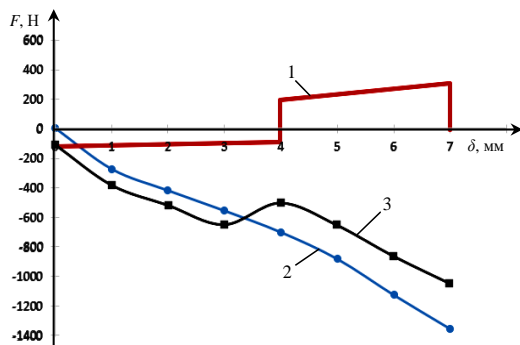
механічної системи контактора -114 Н) і якір почне рух у нижнє положення.

Залежність сили притягування якоря  $F$  до нижнього осердя при мінімальному значенні МРС обмотки відключення  $F_{m0} = -7$  кА та різних значеннях робочого зазору  $\delta$  приведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність сили притягування якоря до нижнього осердя при мінімальному значенні МРС обмотки відключення  $F_{m0} = -7$  кА та робочому зазорі  $\delta$

$\delta$ , мм	0	1	2	3	4	5	6	7
$F$ , Н	5,5	-272	-418	-555	-701	-882	-1126	-1356

За результатами табл. 2 побудовано графік тягової характеристики електромагніта (рис. 6). Знак мінус в розрахунках вказує на те, що сила притягування якоря, що створюється обмоткою відключення, діє по напрямку вниз і якір рухається від верхнього осердя до нижнього. З урахуванням сил, що створюються механічною системою контактора, побудовано результуючу тягову характеристику електромагніта при виконанні операції відключення, яка на всьому проміжку руху якоря має негативне значення, що свідчить про надійне спрацьовування електромагніта і відключення контактора.

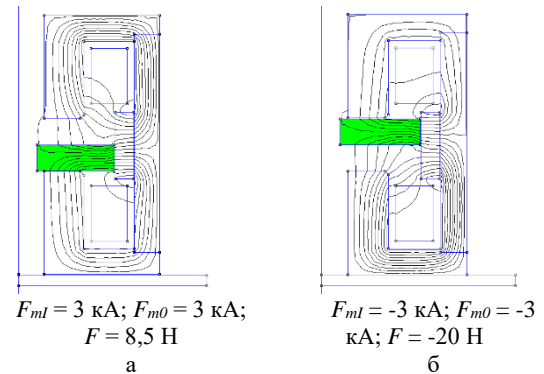


1 – протидіюча характеристика механічної системи контактора; 2 – тягова характеристика електромагніта; 3 – результуюча тягова характеристика електромагніта

Рис. 6. Протидіюча характеристика механічної системи контактора та результуюча тягова характеристика бістабільного поляризованого електромагніта при МРС обмотки відключення  $F_{m0} = -7$  кА та робочому зазорі  $\delta$

**Спільне використання обмоток включення та відключення бістабільного поляризованого електромагніта при виконанні комутаційних операцій контактором.** Попередні розрахунки показали, що для надійного спрацьовування вакуумного контактора мінімальне значення МРС обмоток включення та відключення повинно бути  $F_{m1} = 5$  кА та  $F_{m0} = -7$  кА відповідно. В роботах [6, 7] розглядається можливість зменшення МРС спрацьовування бістабільних поляризованих електромагнітів за рахунок спільного використання обмоток включення та відключення при виконанні відповідних операцій. Суть методу полягає в тому, що при виконанні операції включення контактора струм подається на обмотку включення та відключення електромагніта, при цьому переміщення якоря відбувається при менших

сумарних значеннях МРС, так само відбувається і процес відключення контактора. На рис. 7 показано розрахункові картини магнітного поля при спільному використанні обмоток включення і відключення та виконанні відповідних операцій.



а – операція включення контактора; б – операція відключення контактора

Рис. 7. Розрахункові картини магнітного поля при спільному використанні обмоток включення і відключення та виконанні відповідних операцій

Результати розрахунку показують, що при виконанні операції включення контактора (рис. 7, а) з мінімальним значенням МРС обмоток включення та відключення  $F_m = 3$  кА, сила, що діє на якір, становить 8,5 Н. Враховуючи силу, що створюється механічною системою контактора 310 Н, цього цілком достатньо для переміщення якоря у верхнє положення і гарантованого включення контактора. Процес відключення контактора відбувається при мінімальному значенні МРС обмоток  $F_m = -3$  кА (рис. 7, б), для цього струм на обмотки включення та відключення подається у зворотному напрямі. Сила, що діє на якір, становить -20 Н і з урахуванням сили, що створюється механічною системою контактора -114 Н, цього цілком достатньо для переміщення якоря у нижнє положення і гарантованого відключення контактора.

**Розрахунок обмотувальних даних котушок бістабільного поляризованого електромагніта.** Розрахунки мінімальних значень МРС обмоток включення та відключення дають можливість провести розрахунок обмотувальних даних котушок. Для цього на рис. 8 показано розміри обмотувального простору котушки, він однаковий для обох котушок.

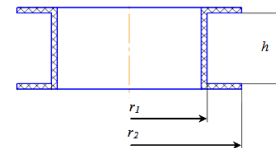


Рис. 8. Креслення каркаса котушки електромагніта

В якості проводу обмоток котушок використовується обмотувальний провід ПЕТВ-2 [8]. Вихідні дані для розрахунку обмотувальних даних котушок електромагніта приведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Вихідні дані для розрахунку обмотувальних даних котушок

Внутрішній діаметр обмотки $r_1$ , мм	20
Зовнішній діаметр обмотки $r_2$ , мм	30
Висота обмотки $h$ , мм	15
Питомий електричний опір міді $\rho$ , Ом·м	$1,8 \cdot 10^{-8}$
Густина міді $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	8900
Коефіцієнт заповнення обмотувального простору $k_3$	0,55

Розрахунок проводиться при різних значеннях номінального діаметру проводу та постійній напрузі 325 В від електролітичного конденсатора (конденсатор заряджається від мережі змінної напруги 230 В через діодний міст). Також розрахунок проводиться при коливаннях напруги мережі живлення в допустимому діапазоні (-15% / +10%), тобто при напрузі заряду конденсатора 276 та 358 В [9]. Результати розрахунку обмотувальних даних котушок електромагніта приведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунку обмотувальних даних котушок при різних значеннях номінального діаметру проводу та напруги джерела живлення

Діаметр проводу $d_m$ , мм	Розрахункові дані	Напруга живлення $U$ , В		
		276	325	358
0,18	$w$	3242		
	$R$ , Ом	360		
	$F_m$ , А	2484	3005	3222
0,2	$w$	2626		
	$R$ , Ом	236		
	$F_m$ , А	3067	3611	3978
0,224	$w$	2093		
	$R$ , Ом	150		
	$F_m$ , А	3847	4530	4990

Аналіз результатів розрахунку показує, що при напрузі джерела живлення 325 В для кожного діаметра обмотувального проводу МРС обмотки становить значення більше 3 кА і контактор гарантовано спрацює. При зменшенні напруги у допустимих межах до 276 В МРС обмотки буде мати значення більше 3 кА тільки для діаметра проводу  $d_m = 0,2$  та  $d_m = 0,224$ . Враховуючи попередні розрахунки, які були спрямовані на зменшення МРС спрацьовування електромагніта, обираємо діаметр обмотувального проводу  $d_m = 0,2$  мм.

**Висновки.** 1. Розглянуто конструкцію вакуумного контактора з бістабільним поляризованим електромагнітом. Побудовано протидіючу характеристику механічної системи контактора та визначено сили, що діють у включеному та відключеному положеннях контактора.

2. Розроблено FEEM модель бістабільного поляризованого електромагніта та проведено розрахунок сили притягування якоря в залежності від різних значень МРС обмоток включення та відключення.

3. Визначено мінімальне значення МРС обмоток включення та відключення та побудовано графік результуючої тягової характеристики електромагніта, що враховує сили протидії механічної системи контактора.

4. Доведено, що за рахунок спільного використання обмоток при виконанні операції включення та

відключення контактора вдалося зменшити МРС спрацьовування бістабільного поляризованого електромагніта.

5. Проведено розрахунок обмотувальних даних котушок та визначено діаметр проводу при якому буде забезпечено мінімальне значення МРС обмотки і контактор гарантовано спрацює.

#### Список літератури

1. 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.
2. Vacuum interrupter for contactor. <http://www.ecvv.com/product/2145016.html>.
3. Лелюк М.А. Аналіз конструкцій приводних механізмів вакуумних контакторів середніх напруг / М.А. Лелюк, Олександр Г. Середя, Олена Г. Середя, В.В. Литвиненко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ «ХПІ». – 2024. – № 1. – С. 10-14.
4. Патент України № 155302 МПК: H01F 7/06, H01H 33/00, H01H 33/42, Бістабільний електромагніт / Лелюк М.А. / № u202302311; заявл. 15.05.2023; опубл. 14.02.2024, Бюл. № 7. – 4 с.: 1 іл.
5. Finite Element Method Magnetics. User's Manual 2006. Version 4.2 [Електронний ресурс] / D. Meeker // Режим доступу: <http://femm.berlios.de>.
6. Бугайчук В.М. Обоснование целесообразности совместного использования обмоток включения и отключения в бистабильных электромагнитных приводах вакуумных выключателей / В.М. Бугайчук, Б.В. Клименко, В.Л. Емельянов // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №3. – С. 21-24.
7. Бугайчук В.М. Об усовершенствовании электромеханических устройств управления обмотками бистабильных электромагнитных актуаторов вакуумных выключателей / В.М. Бугайчук, В.Л. Емельянов, А.В. Ересько, Б.В. Клименко // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №5. – С. 12-17.
8. Теплостійкий провід ПЕТВ-1, ПЕТВ-2. [https://www.sferaline.ua/uk/catalog/teplostoykiy\\_provod\\_petv\\_1\\_petv\\_2/](https://www.sferaline.ua/uk/catalog/teplostoykiy_provod_petv_1_petv_2/).
9. ДСТУ EN 50160:2014 – Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT) / Київ: МІНЕКОНОМПРОЗВИТКУ України, 2014. – 27 с.

#### References (transliterated)

1. Leliuk M.A. Struktura ta kinematychni skhemy vakuumnykh kontaktoriv serednoi napruhy. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Kharkiv: NTU «KhPI». 2016. No 32. Pp. 29-31.
2. Vacuum interrupter for contactor. <http://www.ecvv.com/product/2145016.html>.
3. Leliuk M.A., Oleksandr H. Sereda, Olena H. Sereda, V.V. Lytvynenko Analiz. konstruktivnykh pryvodnykh mekhanizmv vakuumnykh kontaktoriv serednykh napruh. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Kharkiv: NTU «KhPI». 2024. No 1. Pp. 10-14.
4. Patent Ukrainy 155302 MPK: H01F 7/06, H01H 33/00, H01H 33/42, Bistabilnyi elektromagnit. Leliuk M.A. u202302311; zaiavl. 15.05.2023; opubl. 14.02.2024, Biul. 7. 4 p.: 1 il.
5. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User's Manual 2006. Version 4.2 [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <http://femm.berlios.de>.
6. Bugaichuk V.M., Klimenko B.V., Emelianov V.L. Obosnovanie tselesoobraznosti sovmestnogo ispolzovaniia obmotok vklucheniia i otkliucheniia v bistabilnykh elektromagnitnykh privodakh vakuumnykh vyklyuchatelei, Elektrotekhnika i elektromekhanika. 2011. No 3. Pp. 21-24.
7. Bugaichuk V.M., Emelianov V.L., Eresko A.V., Klimenko B.V. Ob usovershenstvovanii elektromekhanicheskikh ustroystv upravleniia obmotkami bistabilnykh elektromagnitnykh aktuatorov vakuumnykh vyklyuchatelei. Elektrotekhnika i elektromekhanika. 2011. No 5. Pp. 12-17.
8. Teplostiikiy provod PETV-1, PETV-2. <https://www.sferaline.ua/uk/>

- catalog/teplostoykiy\_provod\_petv\_1\_petv\_2/.
9. DSTU EN 50160:2014 – Kharakterystyky napruhy elektropostachania v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachnosti (EN

50160:2010, IDT). Kyiv: MINEKONOMROZVYTKU Ukrainy, 2014. 27 p.

Надійшла (received) 22.10.2024

*Відомості про авторів / About the authors*

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

**Серєда Олександр Григорійович (Sereda Oleksandr Hryhoriiovych)** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", 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, доцент кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4658-9554>; e-mail: korolelgn@gmail.com.

**Литвиненко Вікторія Володимирівна (Lytvynenko Viktoriia Vladimirovna)** – старший викладач кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6962-8849>; e-mail: viktoriia.lytvynenko@khpri.edu.ua.