

Б.В. КЛИМЕНКО, М.А. ЛЕЛЮК, В.М. БУГАЙЧУК, Я.Б. ФОРКУН

ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ АКТУАТОР ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА СЕРЕДНІХ НАПРУГ

Представлено огляд застосування моно- та бістабільних неполяризованих та поляризованих актуаторів у контакторах середніх напруг. Проведено аналіз конструктивних особливостей електромагнітних актуаторів та розроблено рекомендацій щодо їх удосконалення. Розглянута нова конструкція бістабільного актуатора на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною, його принцип дії. За рахунок використання кільцеподібного елемента з немагнітного матеріалу між корпусом та сердечником електромагніта вдалося зменшити ефект шунтування не збільшуючи осьовий розмір електромагніта. Для дослідного зразка розраховані магнітні поля у відключеному положенні, при зазорі 12 мм між якорем і нерухомою частиною магнітопроводу та у включеному, при притиснутому якорі. Встановлено вплив кільцевого феромагнітного шунта на тягову силу при відпущеному та притиснутому якорі. Розроблена електромеханічна система керування бістабільним актуатором з однією котушкою. Проведені експериментальні дослідження нового бістабільного актуатора на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною. Встановлено час вмикання та вимикання нового вакуумного контактора.

Ключові слова: вакуумний контактор, моностабільний та бістабільний електромагніт, актуатор, постійний магніт.

Б.В. КЛИМЕНКО, Н.А. ЛЕЛЮК, В.М. БУГАЙЧУК, Я.Б. ФОРКУН

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АКТУАТОР ДЛЯ ВАКУУМНОГО КОНТАКТОРА СРЕДНИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Представлен обзор применения моно- и бистабильных неполяризованных и поляризованных электромагнитов в контакторах средних напряжений. Проведен анализ конструктивных особенностей электромагнитных актуаторов и разработаны рекомендации по их усовершенствованию. Рассмотрена новая конструкция бистабильного актуатора на базе поляризованного моностабильного электромагнита с возвратной пружиной, его принцип действия. За счет использования кольцеобразного элемента из немагнитного материала между корпусом и сердечником электромагнита удалось уменьшить эффект шунтирования не увеличивая осевой размер электромагнита. Для опытного образца рассчитаны магнитные поля в отключенном положении, при зазоре 12 мм между якорем и неподвижной частью магнітопровода и во включенном, при прижатом якорі. Установлено влияние кольцевого ферромагнитного шунта на тяговую силу при отпущенном и притянутом якорі. Разработана электромеханическая система управления бистабильным актуатором с одной катушкой. Проведены экспериментальные исследования бистабильного актуатора на базе поляризованного моностабильного электромагнита с возвратной пружиной. Установлено время включения и выключения нового вакуумного контактора.

Ключевые слова: вакуумный контактор, моностабильный и бистабильный электромагнит, актуатор, постоянный магнит.

B. V. KLIMENKO, M. A. LELIUK, V. M. BUGAICHUK, Y. B. FORKUN

AN ELECTROMAGNETIC ACTUATOR FOR THE MEDIUM VOLTAGE VACUUM CONTACTOR

A review of the use of mono- and bistable unpolarized and polarized electromagnets in medium voltage contactors is presented. The analysis of the design features of electromagnetic actuators is carried out and recommendations for their improvement are developed. A new design of a bistable actuator based on a polarized monostable electromagnet with a return spring, its principle of operation are considered. Due to the use of a ring-shaped element of a non-magnetic material between the case and the core of the electromagnet, it is possible to reduce the effect of shunting without increasing the axial size of the electromagnet. For the prototype, the magnetic fields are calculated in the off position, with a gap of 12 mm between the armature and the fixed part of the magnetic core and in the on position, with the armature pressed. The effect of a ring ferromagnetic shunt on the traction force at the released and pressed armature is determined. The electromechanical control system of a single-coil bistable actuator is developed. Experimental investigations of a bistable actuator based on a polarized monostable electromagnet with a return spring are carried out. The time for switching on and off of the new vacuum contactor is set.

Key words: vacuum contactor, monostable and bistable electromagnets, actuator, permanent magnet.

Вступ. Керування навантагами в мережах середніх напруг зазвичай здійснюється контакторами з комутацією у середовищі шестифтористої сірки (елегазу, SF₆) та вакууму [1]. Тенденції останніх десятиліть свідчать про домінування вакуумних контакторів за рахунок надійності, високої швидкодії, простоти експлуатації та екологічної безпеки. Саме останнє суттєво скоротило використання елегазових контакторів [2].

Комутація головних кіл у вакуумних контакторах здійснюється вакуумними переривниками, які, через механічну систему, керуються електромагнітними актуаторами. В моделях контакторів, що випускаються іно-

земними виробниками, існує два типи актуаторів: з форсованим неполяризованим моностабільним двохстрижневим електромагнітним актуатором (електромагнітом з поворотною пружиною) [3-7] та поляризованим бістабільним електромагнітним актуатором [8].

Аналіз цих конструктивних рішень виявив ряд недоліків, а саме для підтримання контактора з неполяризованим моностабільним двохстрижневим електромагнітним актуатором в увімкненому стані необхідно постійне живлення котушок, що призводить до додаткових витрат електроенергії, а використання механічної заціпки ускладнює конструкцію апарата

© Б.В. Клименко, М.А. Лелюк, В.М. Бугайчук, Я.Б. Форкун, 2018

[9] та знижує його надійність. Використання висококоерцетивних постійних магнітів, в контакторі з поляризованим бістабільним електромагнітним актуатором та однообмоточною котушкою вмикання і вимикання, усуває ці недоліки, але при цьому призводить до збільшення габаритних розмірів приводу та контактора в цілому.

Удосконалення вакуумних контакторів з неполяризованими моностабільними двохстрижневими електромагнітними актуаторами відбувається за рахунок введення додаткових деталей, які підвищують зручність його обслуговування (наприклад, деталей, центруючих поворотну пружину або додаткового важеля, необхідно для зниження швидкості руху кнопки блоку допоміжних контактів) [10, 11], або за рахунок заміни поворотного приводу на прямоходовий привід прямої дії у вигляді паралелепіпеда, котушка якого залита компаундом [12]. При цьому незмінним залишається спосіб керування актуаторами та їх значні габаритні розміри. Застосування таких актуаторів може бути проблематично.

Перспективним напрямом удосконалення актуаторів контакторів є розробка нових або удосконалення існуючих конструкцій електромагнітів на основі використання постійних магнітів. Це дає змогу зменшити енергоспоживання актуаторів, їх габаритні розміри та вагу, при цьому досягаючи значних сил утримання. Роботи в цьому напрямку проводяться як для поворотних так і прямоходових актуаторів.

В неполяризованому моностабільному двохстрижневому електромагнітному актуаторі розташування постійного магніта NdFeB на кожному стрижні робить його поляризованим бістабільним актуатором [13], однак при цьому незмінними залишаються його габаритні розміри.

Більше робіт присвячено удосконаленню та розробці актуаторів прямоходового типу. В роботах [14-18] розглядаються прямоходові поляризовані бістабільні актуатори без поворотних пружин з прямокутною або циліндричною формою корпусу. Виконання операцій вмикання і вимикання забезпечується окремими однообмоточними котушками, а фіксація у цих положеннях відбувається за рахунок постійних магнітів NdFeB при знеструмлених обмотках. Постійні магніти розміщуються між котушкою вмикання та вимикання або тільки між котушкою вмикання. Оптимізація розмірів сердечника актуатора [14] або розташування постійних магнітів зверху та знизу котушки вмикання [15] збільшує концентрацію магнітного потоку в повітряному зазорі між якорем та сердечником, що дає змогу дещо зменшити об'єм постійних магнітів і, відповідно, габаритні розміри актуатора, залишаючи незмінними силу утримання якоря у включеному положенні.

Виконання корпусів циліндричної форми дає змогу зменшити габаритні розміри актуаторів [16] та, за рахунок двох повітряних зазорів між якорем та сердечником та між якорем та корпусом, збільшити силу утримання якоря в притягнутому стані.

В роботі [17, 18] розглядається можливість виконання рухомої та нерухомої частини актуатора з магнітотвердого матеріалу.

В роботі [17] розглядається можливість виконання корпусу електромагніта, з однообмоточною котушкою вмикання та вимикання, або його рухомої частини (якоря) [18] з магнітотвердого матеріалу.

Розглянуті електромагнітні актуатори мають дві котушки, що розташовані одна над одною, але це збільшує осьовий розмір актуатора, а відтак і контактора в цілому. Для зменшення розмірів актуаторів розглядається можливість використання бістабільного поляризованого актуатора, що є поєднанням поляризованого моностабільного електромагніта з однією котушкою і поворотною пружиною. Поворотна пружина може встановлюватися або, безпосередньо, всередині актуатора [19, 20] або входить до складу механічної системи контактора [21-23], наприклад, з розташуванням на привідному важелі.

В розглянутих електромагнітних актуаторах використовуються висококоерцетивні постійні магніти на основі композитних матеріалів, наприклад рідкоземельного металу NdFeB або SmCo. Це обумовлено більшими значеннями залишкової магнітної індукції (Br) та коерцетивної сили (Hc) у порівнянні з іншими магнітотвердими матеріалами [24], що збільшує силу, яку необхідно прикласти до рухомої частини магнітопроводу (наприклад, якоря), щоб його «відірвати» від нерухомої частини (наприклад, корпусу або сердечника електромагніта). Однак такі актуатори небажано кріпити на пласкій сталевій деталі (наприклад, на корпусі контактора), оскільки за рахунок шунтуючої дії зазначеної сталеві деталі, значно зменшиться магнітний потік між якорем і нерухою частиною магнітопроводу і, відповідно, зменшиться тягова сила електромагніту. Для зменшення ефекту шунтування між актуатором і сталеві деталлю, на який він кріпиться, необхідно встановлювати немагнітну прокладку, що призводить до деякого збільшення осьового розміру конструкції актуатора і контактора в цілому.

Використання постійного магніта в якості з'єднувального [13, 17] або рухомого [18] елемента конструкції, розташування його між якорем та нерухою частиною магнітопроводу [19, 21] може призвести до втрати його магнітних властивостей або руйнування [25].

Мета роботи – аналіз конструктивних особливостей електромагнітних актуаторів вакуумних контакторів середніх напруг та розробка рекомендацій щодо їх удосконалення, втілених у новій конструкції актуатора на основі використання висококоерцетивних постійних магнітів.

Бістабільний електромагнітний актуатор на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною. Враховуючи недоліки розглянутих актуаторів у вакуумних контакторах середніх напруг пропонується використання бістабільного електромагнітного актуатора на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною та можливістю його закріплення безпосередньо на

корпус контактора, на його нижню або задню стінку. Нова конструкція електромагніта з кільцеподібним елементом з немагнітного матеріалу, розташованого між корпусом і сердечником [26] представлена на рис. 1. За рахунок використання кільцеподібного елемента з немагнітного матеріалу між корпусом та сердечником електромагніта вдалося зменшити ефект шунтування між корпусом контактора та електромагнітом не збільшуючи осьовий розмір останнього.

Електромагніт містить нерухому і рухому частини магнітопроводу. Нерухома частина магнітопроводу складається з корпусу 1 кільцеподібної форми, фланця 2, сердечника 3 циліндрової ступінчастої форми, котушки 4, постійного магніту 5 і кільцеподібного елемента 6, розташованих усередині корпусу 1. Рухома частина магнітопроводу складається з якоря 7, закріпленого на штоку 8. Шток 8 на його вільній торцевій частині, протилежній торцю із закріпленням якорем 7, містить виступ 9, який дозволяє забезпечити стабільність величини його ходу при виконанні операції вмикання контактора.

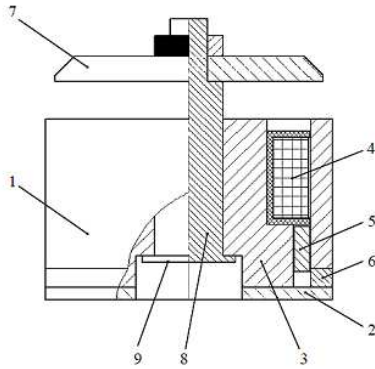


Рис. 1 Електромагніт з кільцеподібним елементом з немагнітного матеріалу, розташованого між корпусом і фланцем

Корпус 1, фланець 2, сердечник 3 і якір 7 виконані з магніт'якого матеріалу. Шток 8 і кільцеподібний елемент 6 виконані з немагнітного матеріалу. Постійний магніт 5 намагнічений в радіальному напрямі і виконаний з висококоерцитивного магнітотвердого матеріалу NdFeB. Фланець 2 та сердечник 3 можна виконати у вигляді однієї деталі.

Електромагніт закріплюється в корпусі вакуумного контактора, і шток 8 з'єднується з контактами вказаного контактора за допомогою зовнішнього пристрою з поворотною пружиною. Саме поворотна пружина забезпечує одно з двох стабільних положень електромагнітного актуатора при знеструмленій котушці 4, коли головні контакти вакуумного контактора розімкненні.

Для дослідного зразка (рис. 1), в пакеті FEMM були розраховані магнітні поля у відключеному положенні, при зазорі 12 мм між якорем і нерухомою частиною магнітопроводу та у включеному, при притиснутому якорі (рис. 2). За відсутності струму в обмотці розрахункові значення сили тяжіння якоря до нерухомої частини магнітопроводу при зазорі 12 мм становить всього 6,3 Н, а у притиснутому стані, сила стає

рівною 2570 Н, що цілком достатньо для підтримання контактора у включеному положенні.

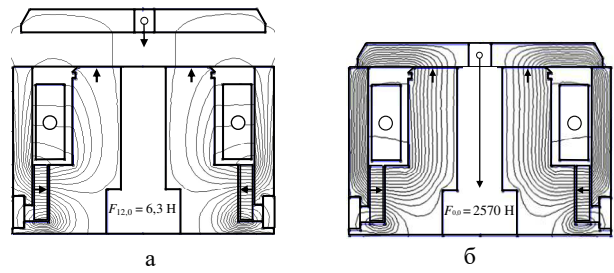


Рис. 2. Розрахункові картини магнітного поля в дослідному зразку при MPC $F_m = 0$: а – при відпущеному якорі; б – притиснутому якорі

Використання кільцевого феромагнітного шунта збільшує тягову силу при відпущеному якорі [27], але при цьому, зменшує силу утримання якоря у притиснутому стані (рис. 3).

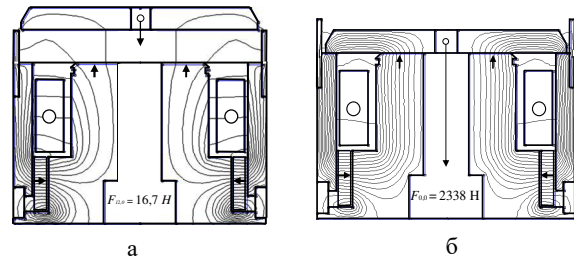


Рис. 3 Розрахункові картини магнітного поля в дослідному зразку з кільцевим феромагнітним шунтом при відпущеному (а) та притиснутому (б) якорі при MPC $F_m = 0$

Сила притискання якоря до нерухомої частини магнітопроводу в дослідному зразку при різних значеннях зазору між якорем і нерухомою частиною магнітопроводу без та з кільцевим феромагнітним шунтом представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Сила притискання якоря до нерухомої частини магнітопроводу

δ , мм	Сила притискання якоря, Н	
	без шунта	з шунтом
0	2570	2338
2	164,8	164,8
4	57,1	66,1
6	28,2	37,2
8	15,9	25,2
10	9,8	21,7
12	6,3	16,7

Збільшення величини сили притискання якоря до нерухомої частини магнітопроводу у відпущеному положенні дає змогу зменшити струм, при якому якір почне свій рух під час вмикання контактора та відповідно загальний час його вмикання.

Замикання головних контактів вакуумного контактора здійснюють за допомогою керуючого пристрою з чотирма силовими комутаційними пристроями, в якості яких можуть використовуватися або контакти механічних комутаційних апаратів (в електро-механічних системах управління), або транзистори або гібридні системи [28] (в мікропроцесорних систе-

мах управління). Струм подається на котушку електромагніта 4, внаслідок чого в нерухомій частині магнітопроводу індукуються магнітний потік, співпадаючий по напрямку з магнітним потоком постійного магніта 5 (рис. 4, а).

Під дією сил, створюваних магнітними потоками, яркір 7 переміщується до корпусу 1 і сердечника 3 і щільно притискається до їх торців. Одночасно з яркіром 7 переміщується шток 8 на величину його ходу, яка становить 12 мм, і за допомогою зовнішнього пристрою замикає головні контакти вакуумного контактора. Після замикання контактів керуючий пристрій відключає подачу струму на котушку 4, а замкнений стан магнітної системи забезпечує сила магнітного потоку, що індукована постійним магнітом 5 (перше стабільне положення), яка повинна перевищувати силу, створювану поворотною пружиною зовнішнього пристрою.

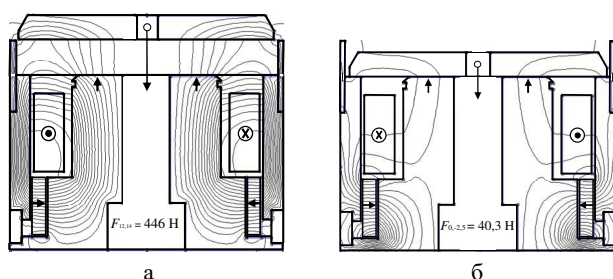


Рис. 4 Розрахункові картини магнітного поля в дослідному зразку з кільцевим феромагнітним шунтом при виконанні операції замикання (а) та розмикання (б) головних контактів при різних значеннях МРС F_m : а – $F_m = 14$ кА; б – $F_m = -2$ кА

Для розмикання головних контактів вакуумного контактора на котушку електромагніту 4 необхідно подати струм у зворотному напрямі, внаслідок чого в нерухомій частині магнітопроводу індукуються магнітний потік, не співпадаючий по напрямку з магнітним потоком постійного магніту 5 (рис. 4, б). При цьому сила утримання яркіря 7 постійним магнітом 5 зменшується і під дією поворотної пружини він переміщується у зворотному напрямі на величину ходу штока 8, головні контакти розмикаються. Після розмикання контактів керуючий пристрій відключає подачу струму на котушку 4 і за рахунок поворотної пружини зовнішнього пристрою яркір 7 знаходиться у другому стабільному положенні.

Експериментальні дослідження бістабільного електромагнітного актуатора на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною були виконані з метою підтвердження теоретичних розрахунків. Для цього на кафедрі «Електричні апарати» НТУ «ХП» було розроблено та виготовлено електромагнітний актуатор, зовнішній вигляд електромагніта якого представлено на рис. 5.

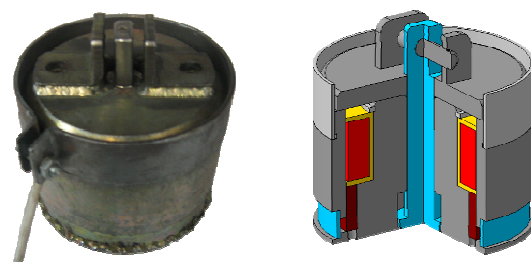


Рис. 5 Поляризований моностабільний електромагніт

Перевірка сили притискання яркіря до нерухомої частини магнітопроводу проводилась на експериментальному стенді (рис. 6). Електромагніт 1 у включеному положенні, коли яркір притиснутий до нерухомої частини магнітопроводу, закріплювався на підставці 2, яка встановлена як показано на рисунку. Між рухомою 3 та нерухомою 4 частинами стенда встановлено динамометр 5 ДПУ-0,5-2, причому, в якості з'єднувального елемента між динамометром 5 та нерухомою частиною стенда 4 використовується шпилька 6. Стрижень 7 встановлювався співвісно зі штоком електромагніта 1 та його вільною частиною ставився на упор відносно виступу штока. Обертання ручки стенда 8 проти годинникової стрілки змушує шпильку 6 вкручуватися, створюючи силу напрям дії якої вказано на рисунку. Через стрижень 3 вона прикладається до штоку, який в свою чергу, з'єднаний яркіром електромагніта. При значенні сили, яка перевищує силу утримання яркіря постійними магнітами, яркір «відривається» від нерухомої частини магнітопроводу. Це значення фіксується динамометром 5.

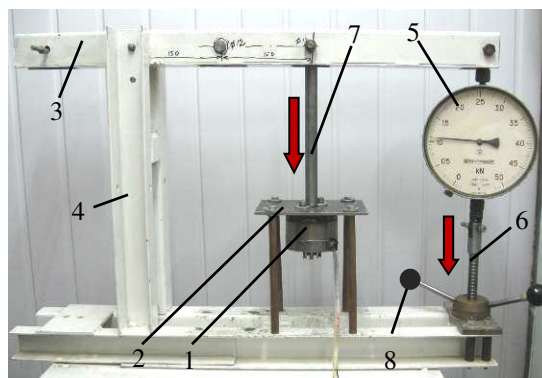


Рис. 6 Стенд для визначення сили притискання яркіря до нерухомої частини магнітопроводу

Враховуючи можливість встановлення стрижня 3 не соосно штоку електромагніту 1 експеримент проводився кілька разів. Кінцеве значення сили притискання яркіря до нерухомої частини магнітопроводу було результатом усереднення отриманих значень та становить 2200 Н (відносна похибка від результатів теоретичних розрахунків склала 5,9 %).

Для перевірки динамічних характеристик електромагнітного актуатора був спроектований та розроблений контактор у новому дизайні, який передбачає можливість встановлення електромагніта розглянутої конструкції безпосередньо на задню стінку корпусу привідного модуля (рис. 7).

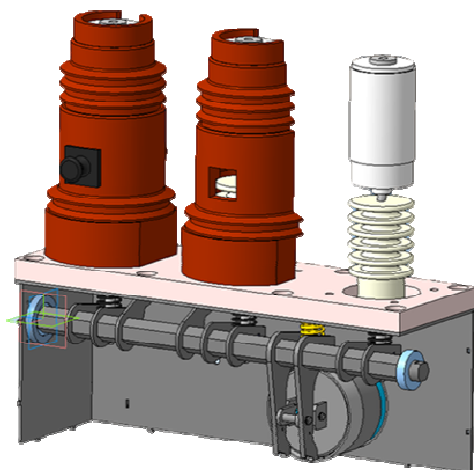


Рис. 7 Новий дизайн вакуумного контактор для мереж середніх напруг

Привідний механізм та механічна система контактора спроектовані у відповідності з вимогами виробників вакуумних переривників [29].

Керування актуатором здійснюється електро-механічною системою, схема якої показана на рис. 8.

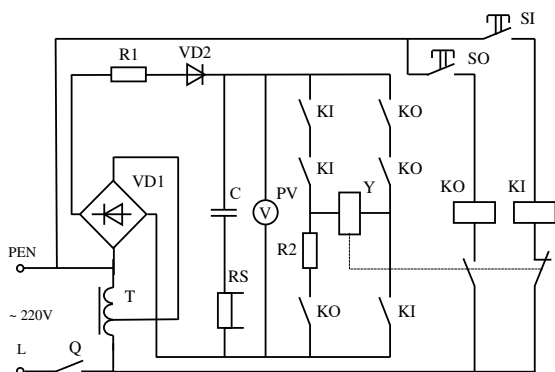
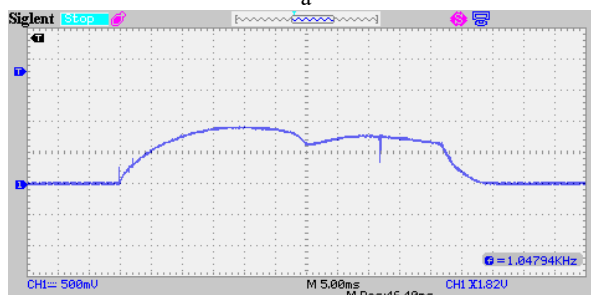


Рис. 8 Електро-механічна схема керування електромагнітним актуатором: Q – вимикач, який забезпечує захист від перевантажень і коротких замикань; T – автотрансформатор; VD1 – діодний міст; R1 – резистор, через який заряджається конденсатор C великої ємності; VD2 – захисний діод; C – електролітичний конденсатор; RS – шунт для осцилографування струму в обмотці електромагніту; PV – вольтметр (контролює напругу на конденсаторі); KI – контактор у колі вмикання електромагніту; KO – контактор у колі вимикання електромагніту; SI, SO – кнопкові вимикачі у колах контакторів KI та KO відповідно; Y – обмотка електромагніта

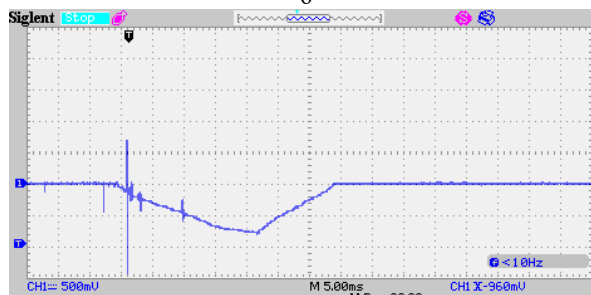
На рис. 9 показано фото нового вакуумного контактора для мереж середніх напруг з бістабільним електромагнітним актуатором на базі поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною та електро-механічною системою керування, а також осцилограми струму в обмотці електромагніта під час виконання операцій вмикання та вимикання контактора.



а



б



в

Рис. 9. Вакуумний контактор для мереж середніх напруг (а), осцилограми струму в обмотці під час операції вмикання (б) та вимикання (в) контактора

З осцилограм видно, що час вмикання контактора складає 55 мс, а вимикання 35 мс і є найменшим серед моделей вакуумних контакторів середніх напруг провідних виробників, таких як ABB (Германія), LVC (Корея), Hyundai (Корея), VMC (Індія) (наприклад, час вмикання та вимикання вакуумного контактора VSC-7 фірми ABB становить 60-90 та 40-60 мс відповідно).

Висновки.

1. Розглянута нова конструкція електромагніту з кільцеподібним елементом з немагнітного матеріалу, розташованого між корпусом і фланцем. За рахунок використання кільцеподібного елемента вдалося зменшити ефект шунтування не збільшуючи осьовий розмір електромагніта.

2. Розроблений новий корпус контактора з привідним механізмом та механічною системою, що цілком задовольняє вимогам виробників вакуумних переривників.

3. Розроблена електро-механічна система керування бістабільним актуатором з однією котушкою.

4. Проведені експериментальні дослідження нового бістабільного актуатора (поляризованого моностабільного електромагніта з поворотною пружиною) підт-

вердили теоретичні розрахунки та здатність забезпечувати спрацьовування контактора та надійне утримання контактів у замкненому стані.

Список літератури

- Клименко Б.В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс: навчальний посібник. – Харків: Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
- Евдокунин Г.А. Современная вакуумная коммутационная техника для сетей среднего напряжения / Г.А. Евдокунин, Г. Тилер. – СПб: Издательство Сизова М.П., 2000. – 114 с.
- Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
- 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
- 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.
- U-Series Вакуумный контактор среднего напряжения. www.hyundai-elec.com.
- Tri-MEC LS Вакуумные контакторы среднего напряжения. Электрооборудование. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
- Medium voltage products V-Contact VSC. Вакуумные контакторы среднего напряжения. Technical catalogue 2015. www.abb.com.
- Лелюк М.А. Структура та кінематичні схеми вакуумних контакторів середньої напруги / М.А. Лелюк // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 32. – С. 29-31.
- Толмачёв В.И., Абдулин Ю.Х., Коновалов В.П., Терентьев Г.Г. Пат. № 2367048 С1 Российская федерация МПК H01H33/666 Вакуумный контактор // № 2008124084/09; заявл. 11.06.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.- 5 с.: 2 ил.
- Толмачёв В.И., Абдулин Ю.Х., Коновалов В.П., Терентьев Г.Г. Пат. № 2367049 С1 Российская федерация МПК H01H33/666 Вакуумный контактор // № 2008124173/09; заявл. 11.06.2008; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.- 7 с.: 4 ил.
- Прохоренко Е.В., Одокиенко С.И. Пат. № 2415488 С1 Российская федерация МПК H01H33/666, E21F17/04 Вакуумный контактор // № 2009125892/03; заявл. 06.07.2009; опубл. 27.03.2011, Бюл. № 9.- 8 с.: 3 ил.
- Fang S.H., Lin H.Y., Ho S.L., Wang X.B., Jin P. Characteristic investigation of permanent magnet actuator for vacuum contactors operating with anintrinsically safe low voltage. Science China Technological Sciences, (2012), vol. 55, No. 6, 1688-1694.
- Yoo Y.M., Kim D.K., Kwon B.I. Optimal design of a permanent magnetic actuator for vacuum circuit breaker using FEM. Journal of Electrical Engineering & Technology, (2006), vol. 1, No. 1, 92-97.
- Hong S.K., Ro J.S., Jung H.K. Optimal design of a novel permanent magnetic actuator using evolutionary strategy algorithm and kriging meta-model. Journal of Electrical Engineering & Technology, (2014), vol. 9, No. 2, 471-477.
- Деклараційний патент України № 70574А МПК: H01F7/08, H01F7/16 Двопозиційний електромагніт / Клименко Б.В., Бугайчук В.М. – Заявл. 09.12.2003 р.; опубл. 15.10.2004, Бюл. № 10.
- Saeed Jalilzadeh, Arash Shabani, Mehdi Zanjani New Design for Electromagnetic Actuator of the VCB and Simulation of Its Static and Dynamic Behavior. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy –PECon 2008, Johor Baharu, Malaysia, December 2008.
- Yatche I., Hinov K., Gueorgiev V. Dynamic characteristics of a bistable linear actuator with moving permanent magnet. Serbian Journal of Electrical Engineering, (2004), vol. 1, No. 2, 207-214.
- Wang X., Lin H., Ho S.L., Fang S., Jin P. Analysis of dynamic characteristics of permanent magnet contactor with sensorless displacement profile control. IEEE Trans. Magn., (2010), vol. 46, No. 6, 1633-1636.
- Zhang J., Cai C., Wu C. Design and analysis of a new permanent magnet actuator for medium voltage vacuum circuit breakers. Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publications, ISSN: 1662-7482, (2013), vol. 313-314, 20-26.
- Kim S.H., Park H.J., Ro J.S., Jung H.K. Design and analysis method for a DC magnetic contactor with a permanent magnet. Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, (2014), vol. 3, No. 4, 481-486.
- Radulian, A., Mocioi, N. Numerical Modelling of an Electromagnetic Actuator for Vacuum Contactors. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering – EPE 2014, Iasi, Romania, October 2014.
- Деклараційний патент України № 15210 МПК: H01H 33/42; H01F 7/00 Електромагнітний привід / Клименко Б.В., Вировець С.В., Форкун Я.Б. – Заявл. 27.12.2005 р.; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6.
- http://www.magnetosgerais.com.br/magnetismo, 2018. Magnetos Gerais - Imãs e Equipamentos Magnéticos.
- Trout S. R., Wooten G. D. Selection and Specification of Permanent Magnet Materials. In: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Sept. 2003: Indianapolis) Proceedings. Indianapolis, 1994. p. 20-23.
- Патент України № 117000 МПК: H01H 33/42, H01F 7/06 Електромагнітний привід / Бугайчук В.М., Клименко Б.В., Лелюк М.А. / № u201613627; заявл. 30.12.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл. № 11.– 11 с.: 12 іл.
- Чепелюк А.А., Вировець С.В. Анализ влияния ферромагнитных шунтов в рабочем зазоре на тяговые усилия в электромагните с однопозиционной магнитной защелкой. // Электротехника и электромеханика. – 2008, №1. – С. 15-17.
- Клименко Б.В., Ересько А.В., Варшамова И.С., Лелюк Н.А. Исследование возможности применения интерфейсных реле в системах гибридной коммутации обмоток бистабильных актуаторов// Электротехника і електромеханіка, 2016, № 1. – С. 21-25.
- http://www.ecvv.com/product/2145016.html.

References (transliterated)

- Klymenko B.V. Elektrichni aparaty. Elektromekhanichna aparatura komutatsii, keruvannia ta zakhystu. Zahalnyi kurs: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: Vyd-vo «Tochka», 2012. 340 p.
- Evdokunin G.A., Tiler G. Sovremennaya vakuumnaya kommutatsionnaya tehnika dlya setey srednego napryazheniya. SPb: Izdatelstvo Sizova M.P., 2000. – 114 p
- Medium Voltage Products V-Contact Medium voltage vacuum contactors. Technical Catalogue 2009. www.abb.com.
- 3TL Vacuum Contactors Selection and Ordering Data Medium-Voltage Equipment. Catalog HG 11.21 2014. www.siemens.com/3TL.
- 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.
- U-Series Vakuumnyi kontaktor srednego napryazheniya. www.hyundai-elec.com.
- Tri-MEC LS Vakuumnye kontaktory srednego napryazheniya. Elektrooborudovanie. Catalogue 2011. eng.lsis.biz.
- Medium voltage products V-Contact VSC. Vakuumnye kontaktory srednego napryazheniya. Technical catalogue 2015. www.abb.com.
- Leliuk M.A. Struktura ta kinematychni skhemy vakuumnykh kontaktoriv srednoi napruhy. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». Kharkiv: NTU «KhPI». 2016. 32. pp. 29-31.
- TolmachYov V.I., Abdulin Yu.H., Konovalov V.P., Terentev G.G. Pat. 2367048 C1 Rossiyskaya federatsiya MPK H01H33/666 Vakuumnyi kontaktor. 2008124084/09; zayavl. 11.06.2008; opubl. 10.09.2009, Byul. 25. 5 p.
- TolmachYov V.I., Abdulin Yu.H., Konovalov V.P., Terentev G.G. Pat. 2367049 C1 Rossiyskaya federatsiya MPK H01H33/666 Vakuumnyi kontaktor. 2008124173/09; zayavl. 11.06.2008; opubl. 10.09.2009, Byul. 25. 7 s.
- Prohorenko E.V., Odokienko S.I. Pat. 2415488 C1 Rossiyskaya federatsiya MPK H01H33/666, E21F17/04 Vakuumnyi kontaktor. 2009125892/03; zayavl. 06.07.2009; opubl. 27.03.2011, Byul. 9. 8 s.
- Fang S.H., Lin H.Y., Ho S.L., Wang X.B., Jin P. Characteristic investigation of permanent magnet actuator for vacuum contactors operating with anintrinsically safe low voltage. Science China

- Technological Sciences, (2012), vol. 55, No. 6, 1688-1694.
14. Yoo Y.M., Kim D.K., Kwon B.I. Optimal design of a permanent magnetic actuator for vacuum circuit breaker using FEM. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, (2006), vol. 1, No. 1, 92-97.
 15. Hong S.K., Ro J.S., Jung H.K. Optimal design of a novel permanent magnetic actuator using evolutionary strategy algorithm and kriging meta-model. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, (2014), vol. 9, No. 2, 471-477.
 16. Deklaratsiyni patent Ukrainy № 70574A MPK: H01F7/08, H01F7/16 Dvopozytsiyni elektromahnit. Klymenko B.V., Buhachuk V.M. – Zaiavl. 09.12.2003 r.; opubl. 15.10.2004, Biul. № 10.
 17. Saeed Jalilzadeh, Arash Shabani, Mehdi Zanjani New Design for Electromagnetic Actuator of the VCB and Simulation of Its Static and Dynamic Behavior. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy – PECon 2008, Johor Baharu, Malaysia, December 2008.
 18. Yatche I., Hinov K., Gueorgiev V. Dynamic characteristics of a bistable linear actuator with moving permanent magnet. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, (2004), vol. 1, No. 2, 207-214.
 19. Wang X., Lin H., Ho S.L., Fang S., Jin P. Analysis of dynamic characteristics of permanent magnet contactor with sensorless displacement profile control. *IEEE Trans. Magn.*, (2010), vol. 46, No. 6, 1633-1636.
 20. Zhang J., Cai C., Wu C. Design and analysis of a new permanent magnet actuator for medium voltage vacuum circuit breakers. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, ISSN: 1662-7482, (2013), vol. 313-314, 20-26.
 21. Kim S.H., Park H.J., Ro J.S., Jung H.K. Design and analysis method for a DC magnetic contactor with a permanent magnet. *Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems*, (2014), vol. 3, No. 4, 481-486.
 22. Radulian, A., Mocioi, N. Numerical Modelling of an Electromagnetic Actuator for Vacuum Contactors. *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering – EPE 2014*, Iasi, Romania, October 2014.
 23. Deklaratsiyni patent Ukrainy № 15210 MPK: H01H 33/42; H01F 7/00 Elektromahnitnyi pryvid. Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Forkun Ya.B. – Zaiavl. 27.12.2005 r.; opubl. 15.06.2006, Biul. 6.
 24. <http://www.magnetosgerais.com.br/magnetismo>, 2018. Magnetos Gerais - Imãs e Equipamentos Magnéticos.
 25. Trout S. R., Wooten G. D. Selection and Specification of Permanent Magnet Materials. In: *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference* (Sept. 2003: Indianapolis) *Proceedings*. Indianapolis, 1994. p. 20-23.
 26. Patent Ukrainy № 117000 MPK: H01H 33/42, H01F 7/06 Elektromahnitnyi pryvid / Buhachuk V.M., Klymenko B.V., Leliuk M.A. № u201613627; zaiavl. 30.12.2016; opubl. 12.06.2017, Biul. № 11.– 11 s.: 12 il.
 27. Chepelyuk A.A., Vyrovets S.V. Analiz vliyaniya ferromagnitnykh shuntov v rabochem zazore na tyagovyye usiliya v elektromagnitnykh sistemah gibridnoy kommutatsii obmotok bistabilnykh aktuatorov. *Elektrotehnika i elektromekhanika*. 2008, 1. Pp. 15-17.
 28. Klimenko B.V., Eresko A.V., Varshamova I.S., Lelyuk N.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya interfeysnykh rele v sistemah gibridnoy kommutatsii obmotok bistabilnykh aktuatorov. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2016, 1. pp. 21-25.
 29. <http://www.ecvv.com/product/2145016.html>.

Надійшла (received) 18.10.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Клименко Борис Володимирович (Клименко Борис Владимирович, Klimentko Boris Vladimirovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри електричних апарати, м. Харків, Україна;

Лелюк Микола Анатолійович (Лелюк Николай Анатольевич, Leliuk Mykola Anatoliyovych) – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач навчальної лабораторії кафедри електричних апарати, м. Харків, Україна; e-mail: lelyuk.nik@gmail.com.

Бугайчук Віктор Михайлович (Бугайчук Виктор Михайлович, Bugaichuk Viktor Mikhailovich) – голова наглядової ради ТОВ "АВМ-Ампер", м. Кременчук, Україна

Форкун Яна Борисівна (Форкун Яна Борисовна, Forkun Yana Borisovna) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, доцент кафедри теоретичної та загальної електротехніки, м. Харків, Україна