

В. В. ГРАБКО, О. В. ДІДУШОК**ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПРИВОДУ ВАКУУМНОГО ВИМИКАЧА ЯК ОБ'ЄКТА ДІАГНОСТУВАННЯ**

В роботі запропоновано спосіб визначення вебер-амперної характеристики електромагніту у процесі роботи вакуумного вимикача. Проведено натурний експеримент із вимірюванням електричних параметрів та розрахунком магнітної характеристики обмоток електромагніту. Здійснено моделювання роботи електромагнітного приводу вимикача у програмі Finite Element Method Magnetics. Відповідність отриманих даних при розрахунку і моделюванні свідчить про вірність запропонованого методу розрахунку магнітної характеристики.

Ключові слова: вимірювання, моделювання, потокозчеплення, електромагнітний привод, обмотка, вакуумний вимикач.

В. В. ГРАБКО, О. В. ДІДУШОК**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПРИВОДА ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ КАК ОБЪЕКТА ДИАГНОСТИКИ**

В работе предложен способ определения вебер-амперной характеристики электромагнита в процессе работы вакуумного выключателя. Проведен натурный эксперимент с измерением электрических параметров и расчётом магнитной характеристики обмоток электромагнита. Осуществлено моделирование работы электромагнитного привода выключателя в программе Finite Element Method Magnetics. Соответствие полученных данных при расчёте и моделировании свидетельствует о верности предложенного метода расчёта магнитной характеристики.

Ключевые слова: измерения, моделирование, потокозчепления, электромагнитный привод, обмотка, вакуумный выключатель.

V. V. HRABKO, O. V. DIDUSHOK**INVESTIGATION OF THE WORK OF THE ELECTROMAGNETIC ACTUATOR OF THE VACUUM CIRCUIT BREAKER AS A OBJECT DIAGNOSTIS**

The role of vacuum switches among switching devices of average voltage is considered in this work. The structure, principle of the action of the electromagnetic actuator of the vacuum circuit breaker is presented. A method for determining the weber-ampere characteristic during the operation of the vacuum circuit breaker is proposed. A full-scale experiment was conducted with the measurement of electrical parameters and the calculation of the magnetic characteristics of the electromagnetic windings. In accordance with the given passport data on the electromagnet of the vacuum circuit breaker VR0, the simulation of the operation of the electromagnetic actuator in the Finite Element Method Magnetics program was performed. The obtained results of modeling the strength of the anchor of an electromagnet in the program correspond to the passport data on the switch. Calculated values of the flow coupling from the experiment are half-dimensional with the results obtained in the simulation of the work of the electromagnet of the vacuum circuit breaker. The correspondence of the data obtained in the calculation and modeling indicates the correctness of the proposed method for calculating the magnetic characteristic of the electromagnet of the direct current of the vacuum circuit breaker.

Key words: measurement, simulation, flux-linkage, electromagnetic actuator, winding, vacuum circuit breaker.

Вступ. В наш час в Україні існує стійка тенденція до підвищення кількості порушень електропостачання відповідальних енергетичних об'єктів, що призводить до негативних наслідків. Досить часто експлуатуються застарілі комутаційні апарати, які потребують капітального ремонту або повної заміни. В енергетичній системі України здійснюється заміна масляних і маломасляних вимикачів 6 ÷ 35 кВ на вакуумні вимикачі. Вакуумні апарати характеризуються максимальними значеннями швидкості відновлення електричної міцності, мінімальною масою рухомих частин і енергією приводу, мінімальними габаритами і масою апарату в цілому, максимальним комутаційним ресурсом. У більшості випадків в якості приводів у вакуумних вимикачах середньої напруги використовують електромагнітний привод на основі "магнітної заціпки".

Особливістю таких приводів є використання високоерцитивних постійних магнітів, які дозволяють рухомій частині електромагніту знаходитися у одному із двох стійких положень ("ВВИМКНЕНО" і "ВИМКНЕНО") без споживання електричної енергії. В таких приводах є дві обмотки, які виконують перемикання між положеннями вимикача. Електромагнітний

привід відіграє вирішальну роль у роботі вакуумного вимикача. Від його роботи залежить надійність електропостачання споживачів. Тому дослідження електромагнітних характеристик які впливають на роботу електромагніту постійного струму вакуумного вимикача є задачею актуальною.

У роботах [1, 2] автори досліджують ступінь впливу вихрових струмів у сердечнику електромагнітного приводу вакуумного вимикача на його динамічні характеристики. В залежності від конструктивного виконання і типу матеріалів змінюються динамічні характеристики електромагнітного приводу вакуумного вимикача. У роботах [3, 4] авторами було розроблено нову конструкцію електромагнітного приводу вакуумного вимикача. Для розроблених вимикачів проведено моделювання роботи та проаналізовано вплив лінійних розмірів магнітопроводу на силу утримання якоря електромагніту. Авторами у роботах [5–9] приведені результати розрахунку статичних тягових характеристик електромагнітних систем, отримані залежності розподілу магнітного потоку у перехідних режимах, проаналізовано вплив додаткового опору на швидкодію електромагнітів постійного струму із магнітною заціпкою.

В перелічених роботах основну увагу присвячено розробці нового зразка електромагнітного приводу вакуумного вимикача. Для запропонованих приводів проведено моделювання та проаналізовано вплив конструкції і матеріалів на його магнітні і динамічні властивості. Проте не менш актуальними є дослідження, згідно яких можна розраховувати магнітні характеристики для вимикачів, що знаходяться у роботі. Аналіз магнітних характеристик електромагніту постійного струму вакуумного вимикача у експлуатації дозволить розраховувати поточний технічний стан приводу, що може бути використано у задачах діагностування [10].

Метою роботи є перевірка запропонованого методу вимірювання магнітної характеристики обмоток електромагніту шляхом комп'ютерного моделювання у програмі Finite Element Method Magnetics (FEMM) роботи електромагнітного приводу вакуумного вимикача.

Результати дослідження. В якості досліджуваного об'єкта розглянуто електромагнітний привод вакуумного вимикача ВР0, виробник ТОВ “ВИСОКО-ВОЛЬТНИЙ СОЮЗ РЗВА”. Вакуумні вимикачі компанії серії ВР0 призначені для комутації електричних кіл при нормальних і аварійних режимах в мережах трифазного змінного струму частотою 50 (60) Гц із номінальною напругою 10 кВ для систем із ізольованою нейтраллю [11].

Привод вакуумного вимикача типу ВР0 – багатофункціональний електромагніт, який здійснює наступні функції:

- надійне і стабільне ввімкнення і вимкнення вимикача із нормованими параметрами;
- надійно фіксує вимикач за допомогою “магнітної зачіпки” в крайніх положеннях “ВВІМКНЕНО” і “ВИМКНЕНО”;
- забезпечує ручне нормоване вимкнення за допомогою кнопки ручного вимкнення.

На рисунку 1 зображено конструкцію електромагнітного приводу вимикача ВР0.

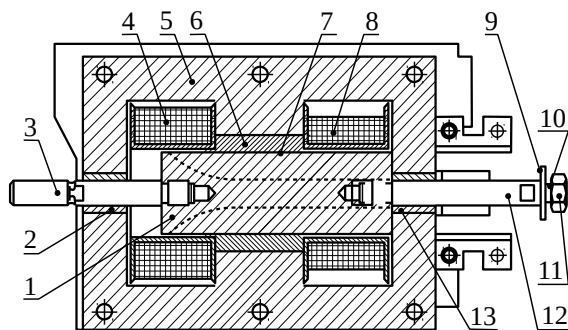


Рис. 1. Електромагнітний привод вимикача ВР0:

- 1 – якорь; 2 – призма; 3 – шток; 4 – обмотка ввімкнення;
5 – магнітопровід; 6 – постійний магніт; 7 – фольга;
8 – обмотка вимкнення; 9 – шайба; 10 – шайба; 11 – гайка;
12 – шток; 13 – призма

У вимкненому стані силові контакти вакуумного вимикача розімкнуті, якорь електромагніту утримується в крайньому положенні за допомогою магнітів 6. Для ввімкнення вимикача необхідно через обмотку вві-

мкнення пропустити постійний струм, при якому сила в магнітному колі ввімкнення перевищить силу притягання постійними магнітами 6 якоря 1 у магнітному колі вимкнення. Після перевищення сили зрушення якоря 1 починає рухатися із прискоренням, що призводить в рух усю кінематичну систему вимикача. При досягненні магнітопроводу якорем 1 вимикач вмикається і фіксується в даному положенні постійним магнітом 6 (“магнітна зачіпка”). Чим меншим стає зазор між якорем і магнітопроводом магнітного кола, тим більша сила тяги постійних магнітів. Для вимкнення вимикача необхідно через обмотку вимкнення пропустити постійний струм у напрямку, при якому сила дії на якоря 1 перевищить результуючу силу утримання постійними магнітами 6 вимикача у ввімкненому положенні. Процес вимкнення закінчується, коли якоря 1 замикає собою магнітне коло вимкнення електромагніту і тим самим надійно фіксує вимикач у вимкненому положенні постійними магнітами 6.

Роботу електромагнітного приводу вакуумного вимикача можна описати за допомогою вебер-амперної характеристики, яка зображена на рис. 2. Проаналізуємо її.

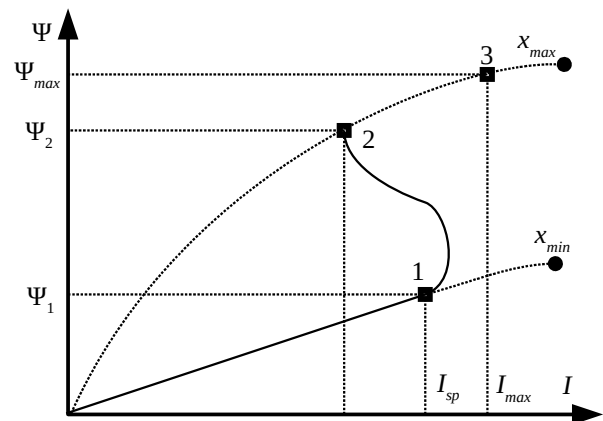


Рис. 2. Вебер-амперна характеристика робочого циклу електромагніту

Після подачі живлення на електромагніт, струм в обмотці досягає значення струму зрушення (точка 1). В цей момент часу шток електромагніту розпочинає рух, в результаті робочий зазор x зменшується, індуктивність обмотки зростає, а струм в ній спадає до тих пір, поки якоря не досягне упору, що відповідає точці 2. Під час руху штока взаємозв'язок між потокозчеплення ψ і струмом I визначається кривою 1-2. Після закінчення руху штока електромагніту струм знову починає зростати і досягає сталого значення у точці 3. В момент відключення живлення електромагніту струм в обмотці спадає і при досягненні значення струму відпускання, шток розпочинає рух, а робочий зазор збільшується від мінімального x_{min} до максимального x_{max} . Далі струм спадає до нуля.

Енергетичне перетворення в електромагнітному пристрої описується формулою [12]:

$$u = i \cdot R_a + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

де u – напруга живлення обмотки електромагніту;

i – миттєве значення струму в обмотці електромагніту;

R_a – активний опір обмотки;

Ψ – миттєве значення потокозчеплення обмотки;

t – час.

Із рівняння (1) магнітна характеристика електромагнітного приводу має вигляд:

$$\Psi = \int (u(t) - i(t) \cdot R_a) dt. \quad (2)$$

Рівняння (2) описує криву намагнічування магнітопроводу і визначає ступінь перетворення магнітної енергії в механічну і обумовлює величину діючої в певний момент електромагнітної сили.

Для чисельного розрахунку магнітної характеристики знайдемо диференціали потокозчеплення:

$$d\Psi = (U_i - I_i \cdot R_a) \cdot (t_i - t_{i-1}), \quad (3)$$

де U_i – значення напруги живлення обмотки електромагніта;

I_i – значення струму, який протікає через електромагніт;

t_i – час протягом якого здійснюється вимірювання напруги та струму;

i – порядковий номер кроку вимірювання.

Відповідно значення потокозчеплення на i -ому кроці вимірювання:

$$\Psi_i = \Psi_{i-1} + d\Psi_i. \quad (4)$$

Для розрахунку магнітної характеристики, на першому кроці (при $i = 1$) прийнято величину потокозчеплення $\Psi_1 = 0$. При подальшому обчисленні використовуються виміряні значення на кожному відповідному кроці вимірювання.

Для розрахунку веберамперної характеристики електромагніту постійного струму вакуумного вимикача проведено натурний експеримент із вакуумним вимикачем типу ВР0-10-12,5/630 У2.

Структурна схема експериментальної установки для дослідження веберамперної характеристики електромагнітного приводу наведена на рисунку 3.

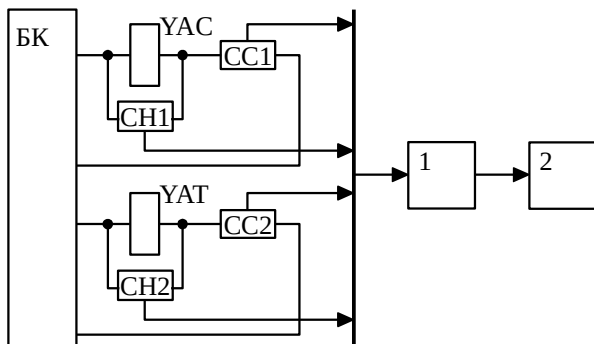


Рис. 3. Структурна схема експериментальної установки

Управління роботою вимикача здійснюється за допомогою блока керування БК. Для отримання вебер-амперних характеристики обмоток електромагнітного приводу здійснюється ввімкнення та вимкнення вакуумного вимикача ВР0. Під час ввімкнення вимикача проводяться вимірювання струму, який протікає через обмотку ввімкнення YAC (сенсор струму CC1), напруги на обмотці ввімкнення YAC (сенсор напруги CH1). Під час вимкнення вимикача проводяться вимі-

рювання струму, який протікає через обмотку вимкнення YAT (сенсор струму CC2), напруги на обмотці вимкнення YAT (сенсор напруги CH2). Після вимірювання струму та напруги на обмотках здійснюється вимірювання їх активних складових опорів. Отримання вимірюваної інформації здійснюється за допомогою інформаційно-вимірювальної системи 1, а результати вимірювання та розрахунку виводяться і зберігаються на персональний комп'ютер 2.

Зовнішній вигляд експериментальної установки зображено на рисунку 4. Відповідно до формул (2)-(4) розраховано значення потокозчеплення для обмоток ввімкнення та вимкнення при комутації вакуумного вимикача, результати розрахунку потокозчеплення представлено у таблиці 1.

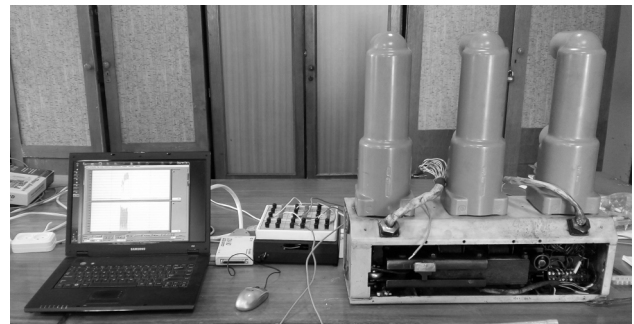


Рис. 4. Зовнішній вигляд експериментальної установки

Результати моделювання. Для перевірки розрахунку магнітної характеристики електромагнітного приводу проведено моделювання роботи електромагніту вимикача у програмі FEMM. Програма Finite Element Method Magnetism (Магнітні розрахунки методом скінчених елементів) дозволяє створювати моделі для розрахунку плоскопаралельного або плоскомеридіанного стаціонарного і квазістаціонарного магнітного і стаціонарного електростатичного та теплового полів, побудувати їх картини і визначити польові і колові параметри. Задачі розрахунку магнітних полів можуть бути як лінійні, так і нелінійні [13].

При реалізації методу скінчених елементів розрахункова область, в якій здійснюється розрахунок, розбивається на об'ємні (для об'ємних полів) або плоскі (для плоскопаралельних полів) елементи кінцевої величини, всередині яких значення магнітного потенціалу апроксимуються кусково-плоскою функцією. Розміри і форми елементів можуть довільно змінюватися, а їх взаємні з'єднання можуть мати різну структуру. При виборі розмірів і форми елементів враховується очікуваний розподіл щільності енергії в межах розглянутої області.

Після розбивки розрахункової області на елементи і накладення граничних умов розраховуються коефіцієнти апроксимації, виходячи з мінімуму функціоналу, що визначає сумарну накопичену енергію системи за умови з'єднання потенціалів у вузлах. Вид функціоналу для феромагнітного середовища має вигляд:

$$F(A) = \int_V W(\vec{A}) \cdot dV - \int_V \vec{J} \cdot \vec{A} \cdot dV, \quad (5)$$

де $W(\vec{A})$ – питома енергія:

Таблиця 1 – Порівняння результатів розрахунку поточкозчеплення дослідним шляхом та моделюванням у програмі FEMM

Процес	Експериментальні дані			Потокозчеплення обмотки Ψ , Вб, розраховане		Похибка, %
	Струм I, А	Напруга U, В	Активний опір обмотки R_a , Ом	за експериментальними даними	у FEMM	
Ввімкнення	11,12	188,82	12,8	3,76	4,03	6,8
	8,01	0		4,01	4,23	5,3
	6,01	272,8		4,35	4,56	4,6
	5,01	281,61		4,73	4,99	5,2
	2,64	74,12		5,11	5,5	7,2
Вимкнення	17,47	202,14	8,3	2,52	2,74	8,3
	14,0	0		2,38	2,53	6,1
	11,51	70,52		2,98	3,14	5,3
	8,01	0		2,89	3,03	4,8
	4,13	186,14		2,99	3,22	7,3

$$W(\vec{A}) = \int \vec{H} \cdot d\vec{B}, \quad (6)$$

де V – об'єм, який займає феромагнетик;

\vec{J} – вектор щільності струму в обмотці електромагніту;

\vec{A} – векторний магнітний потенціал;

\vec{B} – вектор магнітної індукції;

\vec{H} – вектор напруженості магнітного поля.

Вектор магнітної індукції:

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A}. \quad (7)$$

Вектор напруженості магнітного поля:

$$\vec{H} = v \cdot \vec{B}, \quad (8)$$

де v – величина обернено пропорційна магнітній проникності.

Для плоскопаралельного поля вектор електромагнітної сили, що діє на якор, визначається по заданому розподілу магнітної індукції:

$$\vec{Q} = \frac{1}{\mu_0} \int_l \left((\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{B} - \frac{1}{2} (B^2) \cdot \vec{n} \right) \cdot dl, \quad (9)$$

де l – довжина контуру інтегрування;

\vec{n} – вектор зовнішньої нормалі до елементарної ділянки контуру інтегрування dl .

Розрахункова модель (осесиметрична задача) магнітної системи досліджуваного електромагніту вакуумного вимикача у вимкненому положенні приведена на рисунку 5.

По заданим вхідним параметрам промодельовано у програмі FEMM роботу електромагнітного приводу у крайніх та проміжних положеннях. Тип електромагніту Е-10. Матеріал пластин магнітопроводу ОЦ 08 кп ВГ-МТ-УР-2. Матеріал осердя Сталь 10. Матеріал постійного магніту Nd-Fe-B із коерцитивною силою 860 кА/м, залишкова індукція 1,18 Тл. Обмотка ввімкнення – 1200 витків, активний опір $13 \pm 1,3$ Ом, провід ПЭТ-155-0,8; обмотка вимкнення – 800 витків, активний опір $7,5 \pm 0,7$ Ом, провід ПЭТ-155-0,8. На рисунку 6 представлено розподіл магнітного поля в електромагніті у ввімкненому та вимкненому стані.

Для порівняння результатів моделювання роботи електромагніту та паспортних даних на вимикач розраховуємо силу утримання якоря електромагніту відповідно до розробленої моделі у програмі FEMM методом інтеграла тензора Максвелла. Результати порівняння моделювання та паспортних даних представлено у таблиці 2.

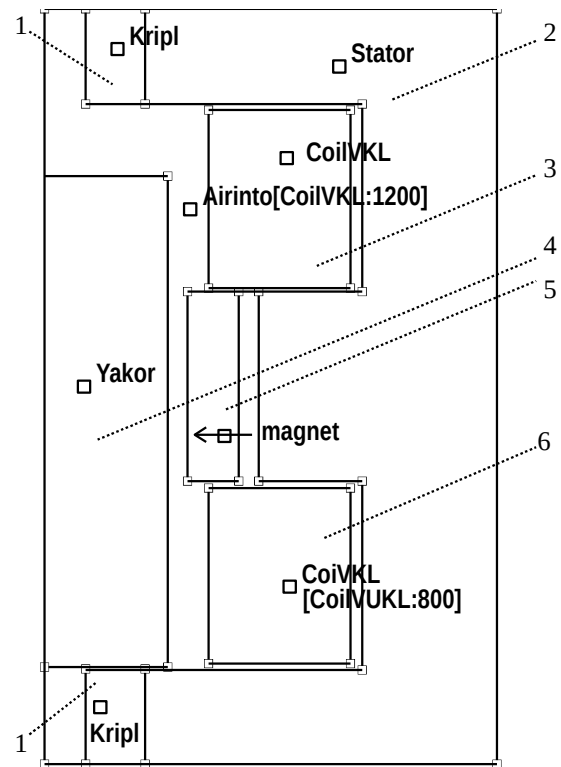


Рис. 5. Розрахункова модель магнітної системи електромагнітного приводу вакуумного вимикача у програмі FEMM: 1 – кріплення призми; 2 – магнітопровід; 3 – обмотка ввімкнення; 4 – осердя; 5 – постійний магніт; 6 – обмотка вимкнення

Таблиця 2 – Порівняння результатів моделювання та паспортних даних сили утримання якоря вимикача

Вихідна інформація	Електромагнітна сила утримання якоря вакуумного вимикача ВР0	
	у положенні "ВВІМКНЕНО" Fem, Н	у положенні "ВИМКНЕНО" Fem, Н
Паспортні дані на вакуумний вимикач	3000±300	3000±300
Моделювання роботи електромагніту у FEMM	2745,03	3000,29

Відповідно до отриманих значень можна зробити висновок, що результати моделювання коректні, оскільки вони знаходяться в діапазоні значень, які допускаються паспортними даними на вимикач.

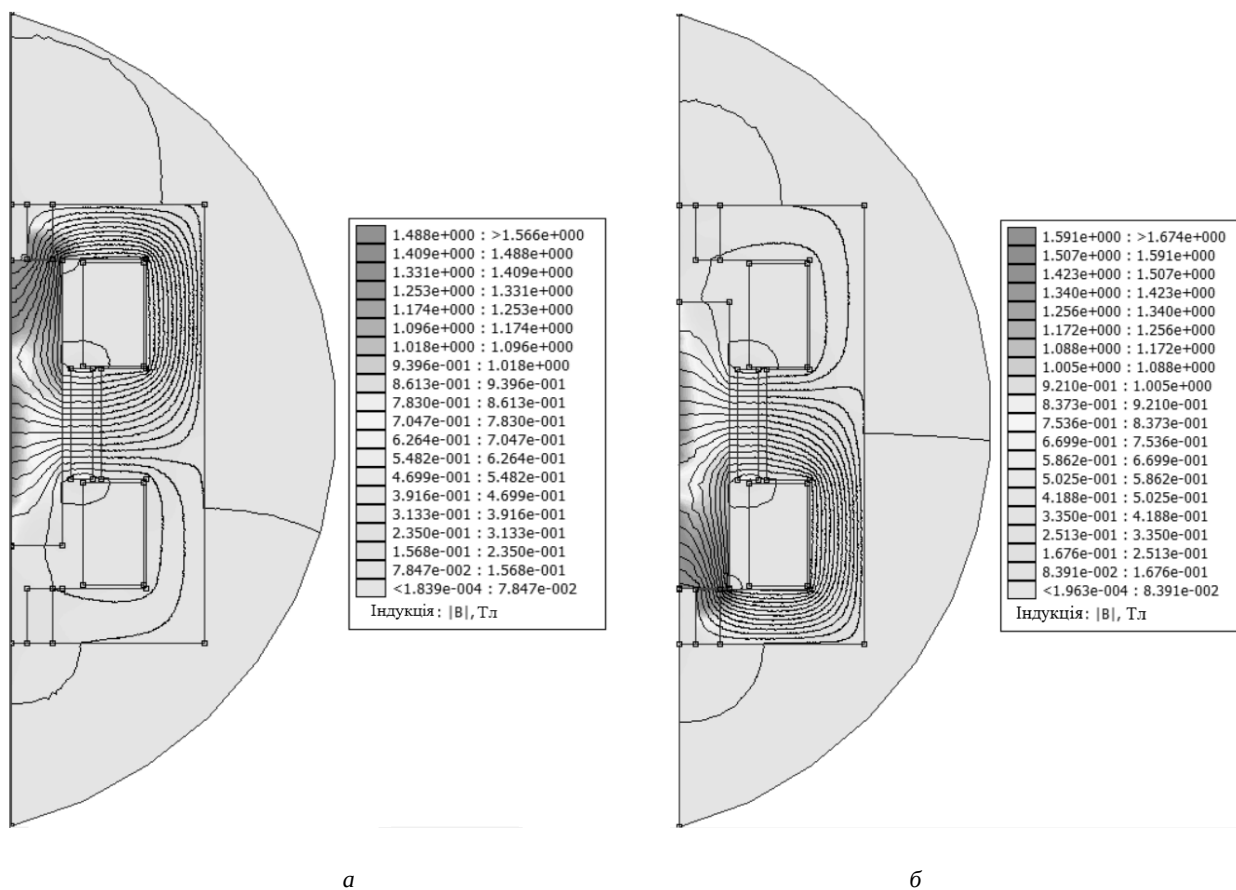


Рис. 6. Розподіл магнітного поля в електромагніті вакуумного вимикача у крайніх положеннях:
а – електромагніт у вимкненому положенні; б – електромагніт у ввімкненому положенні

Програма FEMM дозволяє проводити розрахунок параметрів електричних кіл. При ввімкненні/вимкненні електромагнітного приводу промодельовано та розраховано потокозчеплення для різних позицій. Результати порівняння даних, отриманих при експерименті та при моделюванні у FEMM, наведені у таблиці 1.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновки, що розрахункові значення потокозчеплення для обмоток електромагніту вакуумного вимикача підтверджуються моделюванням у програмі FEMM. Отримані результати у FEMM перевищують значення потокозчеплення, розраховані за результатами експерименту, але похибка складає у середньому 5 %.

Отже, наведений спосіб отримання вебер-амперної характеристики є адекватним і розрахункові дані потокозчеплення можуть бути використані для діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі аналізу вебер-амперних характеристик обмоток в процесі його експлуатації.

Висновок. Вакуумні вимикачі мають позитивну динаміку розвитку та впровадження у експлуатацію енергетичної системи. Електромагнітний привід займає вирішальну роль у роботі вакуумного вимикача.

Проведено натурний експеримент із визначенням вебер-амперної характеристики вакуумного вимикача. Для вакуумного вимикача розроблено модель у програмі FEMM. Проведено розрахунок його магнітної системи. Визначено потокозчеплення обмоток ви-

микача при його ввімкненні та вимкненні. Результати моделювання підтверджують доцільність застосування запропонованого методу визначення магнітної характеристики обмоток вимикача.

Запропонований спосіб отримання магнітної характеристики можна використовувати при діагностуванні технічного стану електромагнітного приводу вакуумного вимикача.

Список літератури

1. Гречко А. М. Экспериментальное исследование влияния выхревых токов в сердечнике магнитопровода на динамические характеристики электромагнитного привода. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2012, Вип. 49 (955). С. 9 – 17.
2. Клименко Б. В., Гречко А. М. Электромагнитный привод с двухпозиционной магнитной защелкой для вакуумного выключателя среднего напряжения. *Електротехніка і Електромеханіка*. Харків: НТУ «ХПІ». 2007, №6. С. 40 – 43.
3. Гречко А. М. Исследование и расчет размеров магнитопровода электромагнита с однопозиционной магнитной защелкой. *Електротехніка і Електромеханіка*. Харків: НТУ «ХПІ». 2008, №2. С. 15 – 20.
4. Выровец С. В., Чепелюк А. А. Анализ влияния ферромагнитных шунтов в рабочем зазоре на тяговые усилия в электромагните с однопозиционной магнитной защелкой. *Електротехніка і Електромеханіка*. Харків: НТУ «ХПІ». 2008, №1. С. 15 – 17.
5. Байда Е. И. Расчет динамики двухпозиционного электромагнита постоянного тока с магнитной защелкой. *Електротехніка і Електромеханіка*. Харків: НТУ «ХПІ». 2010, №4. С. 10 – 12.

6. Байда Е. И. Динамика нечеткого срабатывания бистабильного электромагнитного актуатора на базе высококоэрцитивных постоянных магнитов. *Электротехника и Электромеханика*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2012, №5. С. 18 – 20.
7. Alexandru Răduľian, Mihai Maricar, Iosif Vasil, Radu Crețu. New solution of linear DC actuator with additional permanent magnets: Working principle, design and testing. *Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie: Électrotechnique et Énergétique*. Bucarest, 2017, Vol. 62 (1). pp. 3 – 7.
8. Yong-Min Y., Dae-Kyung K., Byung-Il K. Optimal Design of a Permanent Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breaker using FEM. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2006. Vol. 1(1). pp. 92 – 97.
9. Zhenxing W. A., Liqiong S., Sainan H., Yingsan G., Zhiyuan L. Permanent Magnetic Actuator for 126 kV Vacuum Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50(3). pp. 129 – 135.
10. Грабко В. В., Дідушок О. В. Метод діагностування електромагнітного приводу вакуумного вимикача на основі вебер-амперних характеристик. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця: ВНТУ, 2018, Вип.6. С. 53 – 61.
11. НКАИ.674152.006. РЭ. Выключатели вакуумные серий ВР0 и ВР1. Руководство по эксплуатации. Ровно: ООО «Высоковольтный союз РЗВА», 2003. 40 с.
12. Сливинская А. Г. *Электромагниты и постоянные магниты: учебное пособие для студентов вузов*. Москва: Энергия, 1976. 248 с.
13. Буль О. Б. *Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие*. Москва: Академия, 2005. 336 с.
4. Vyrovce S. V., Chepeljuk A. A. *Analiz vlijanija ferromagnitnyh shuntov v rabochem zazore na tjavovye usilija v jelectromagnite s odnopo-zicionnoj magnitnoj zashhelkoj* [Analysis of the influence of ferromagnetic shunts in the working gap on traction forces in an electromagnet with a single-position magnetic latch]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics]. Kharkiv: NTU «KhPI». 2008, №1. pp. 15 – 17.
5. Bajda E. I. *Raschet dinamiki dvuhpozicionnogo jelectromagnita postojannogo toka s magnitnoj zashhelkoj* [Calculation of the dynamics of a two-position DC electromagnet with a magnetic latch]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics]. Kharkiv: NTU «KhPI». 2010, №4. pp. 10 – 12.
6. Bajda E. I. *Dinamika nechetkogo sratyvanija bistabil'nogo jelectromagnitnogo aktuatora na baze vysokokojercitivnyh postojannyh magnitov* [The dynamics of fuzzy operation of a bistable electromagnetic actuator based on high-coercive permanent magnets]. *Elektrotehnika i Elektromekhanika* [Electrical Engineering and Electromechanics]. Kharkiv: NTU «KhPI». 2012, №5. pp. 18 – 20.
7. Alexandru Răduľian, Mihai Maricar, Iosif Vasil, Radu Crețu. New solution of linear DC actuator with additional permanent magnets: Working principle, design and testing. *Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie: Électrotechnique et Énergétique*. Bucarest, 2017, vol. 62 (1). pp. 3 – 7.
8. Yong-Min Y., Dae-Kyung K., Byung-Il K. Optimal Design of a Permanent Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breaker using FEM. *Journal of Electrical Engineering & Technology*. 2006, vol. 1(1). pp. 92 – 97.
9. Zhenxing W. A., Liqiong S., Sainan H., Yingsan G., Zhiyuan L. Permanent Magnetic Actuator for 126 kV Vacuum Circuit Breakers. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014, vol. 50(3). pp. 129 – 135.
10. Hrabko V. V., Didushok O. V. *Metod diahnostuvannia elektromagnitnoho pryvodu vakuumnoho vymykacha na osnovi veber-ampernih kharakterystyk* [Method of diagnosis of electromagnetic actuator of vacuum circuit breaker on the basis of weber-ampere characteristics]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. [Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute]. Vinnytsia: VNTU, 2018, Vyp. 6. pp. 53 – 61.
11. NKAИ.674152.006. РЕ. *Vyklyuchateli vakuumnye serij VR0 i VR1. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Vacuum Circuit Breakers Series VR0 and VR1 Operation Manual]. Rowno: ООО «Vysokovol'tnyj soyuz RZVA», 2003. 40 p.
12. Slivinskaja A. G. *Jelectromagnity i postojannye magnity: uchebnoe posobie dlja studentov vuzov* [Electromagnets and permanent magnets: textbook for university students]. Moskva: Jenergija, 1976. 248 p.
13. Bul' O. B. *Metody rascheta magnitnyh sistem jelektricheskikh apparatov. Magnitnye cepi, polja i programma FEMM* [Methods for calculating the magnetic systems of electrical apparatus. Magnetic circuits, fields and the FEMM program]. Moskva: Akademija, 2005. 336 p.

References (transliterated)

Надійшла 03.05.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Грабко Володимир Віталійович (Грабко Владимир Витальевич, Hrabko Volodymyr Vitaliyovych) – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, професор кафедри електро-механічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті, м. Вінниця, Україна: e-mail: grabko@vntu.edu.ua

Дідушок Олег Васильович (Дидушок Олег Васильевич, Didushok Oleh Vasylovych) – інженер автоматизованих систем керування виробництвом, Вінницька філія ТОВ «КСК–Автоматизація», м. Вінниця, Україна: e-mail: didushokov@gmail.com