

Spacecraft Main Magnetic Parameters // IEEE Systems Readiness Technology Conference (AUTOTESTCON'97). – Anaheim (California). – 1997. – Р. 669-675. **2.** Розов В.Ю. Системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля енергонасичених об'єктів: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.09.03. / ІЕД НАНУ. – Київ, 2002. – 40 с. **3.** Волохов С.А., Івлева Л.Ф. Методическая погрешность измерений магнитного момента // Технічна електродинаміка. – 1996. – № 4. – С. 72-74. **4.** ГОСТ 20906-75. Средства измерений магнитных величин. Термины и определения. Введ. 01.07.76. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 10 с. **5.** Волохов С.А., Гузев С.Т., Жадобин Н.Е., Назаров Ю.И., Румакова В.И. Новое в определении уровней магнитных полей, допустимых и безопасных расстояний судового электрооборудования и судовых электронных систем в соответствии с требованиями международных стандартов // Труды международной конференции по судостроению (ISC). – Секция F. Судовая электродинамика, магнетизм и гидрофизика. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1994. – С. 169-176. **6.** Волохов С.А., Добродеев П.Н., Івлева Л.Ф., Кильдишев А.В. Метрологическое обеспечение измерений магнитных параметров судового оборудования // Труды Второй международной конференции по судостроению (ISC'98). – Том 2. – С.-Петербург: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – 1998. – С. 28-34. **7.** Kildishev A. V., Nyenhuis J. A., Hetman A. V. Zonal Magnetic Signatures in Spherical and Prolate Spheroidal Analysis // 2nd International Conference on Marine Electromagnetics (MARELEC'99). – Brest (France). – 1999. – Р. 231-242. **8.** Holmes John J. Theoretical Development of Laboratory Techniques for Magnetic Measurement of Large // IEEE Transactions on Magnetics. – 2001. – Vol. 37, № 5. – Р. 3790-3797. **9.** Chadebec O., Rouve L-L., Coulomb J-L. New method for a fast and easy computation of stray fields created by wound rods // IEEE Transactions on Magnetics. – 2002. – Vol. 38. – Р. 1005-1010. **10.** Rouve L-L., Bongiraud J-P., Thiec P. Le, Coulomb J-L. Application of the spherical harmonic model to identify the magnetic state of a system and to extrapolate its signature // Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 15, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (III), IOS Press, 1999. – Р. 136-144. **11.** Smythe W. Static and Dynamic Electricity. – ISBN: 0891169172, Publisher: Hemisphere Publishing Corporation, 1989. – 623 p. **12.** Абрамович М., Стиган И. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. – М.: Мир, 1979. – 832 с. **13.** Паркинсон У.Д. Введение в геомагнетизм. – М.: Мир, 1986. – 528 с. **14.** Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с. **15.** Кузнецов Д.С. Специальные функции. – М.: Высшая школа, 1965. – 272 с.

Поступила в редколлегию 14.05.08

УДК 621.318.4

Є.В. ГОНЧАРОВ,
Е.Т. КИРПИЛЬОВА,
О.О. МИХАЙЛОВ

ДОСЛІДЖЕННЯ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У статті зроблено аналіз магнітної системи за отриманими експериментально вольтамперними характеристиками (ВАХ). За аналіз взято Ш-образний магнітопровід магнітного пускача з котушкою намагнічування. Розроблено модель магнітної системи в математичному пакеті *FEMM*, отримані результати порівняно з експериментальними.

В статье сделан анализ магнитной системы за полученными экспериментально вольтамперными характеристиками (ВАХ). За анализ взято Ш-образный магнитопровод магнитного пускателя с катушкой намагничивания. Разработана модель магнитной системы в математическом пакете *FEMM*, получены результаты сравнены с экспериментальными.

Якщо в якості навантаження електричної мережі виступає котушка індуктивності, то, вимірявши напругу, значних складностей у визначенні реактивного опору не виникає: $Z = \frac{U}{I}$; $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$, де активний опір обмотувального проводу котушки визначається як $R = r \frac{l}{s}$ (або дослідним шляхом на постійному струмі).

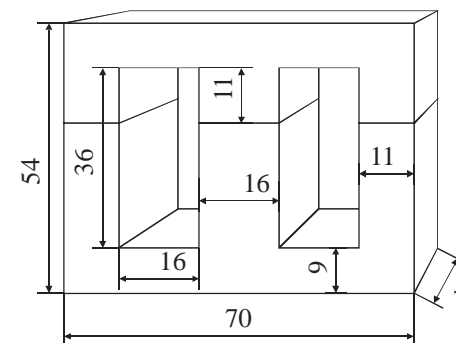


Рис. 1. Конструкція магнітопроводу магнітного пускача

Індуктивність можна визначити як:

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f}. \quad (1)$$

Реактивна складова напруги, відповідно, складає

$$U_L = \sqrt{U^2 - U_R^2}. \quad (2)$$

Виходячи з того, що активна складова $U_R \ll U$, то при розрахунку можна прийняти $U_L = U$.

На відміну від дроселя вольт-амперна характеристика соленоїду має лінійну залежність. В даному випадку треба враховувати нелінійність, яка пов'язана з кривою намагнічування. Крім цього, магнітна система може мати повітряний зазор, який може варіюватися у позначеному діапазоні, і, змінюючи магнітний опір, відповідним чином впливати на реактивний опір котушки.

Для розрахунку надпровідникового обмежувача струму було запропоновано перехід до еквівалентної моделі його осердя [1], що дає можливість ефективно використовувати програму *FEMM* для аналізу магнітного поля як при наявності високотемпературного надпровідного (ВТНП) екрана, так при заміні його на ВТНП котушку.

З метою оцінки такого підходу було проведено експериментальне дослідження магнітної системи магнітного пускача, зробленого з шихтованої сталі товщиною пластин 0,5 мм, конструкція якого показана на рис. 1.

Витки котушки намагнічування зроблені з міді, а корпус з карболіту (фенолформальдегід РР). Висота котушки складає 29 мм, а середній радіус обмотки 23 мм. Провід обмотки навитий з проводу ПЕВ діаметром 0,71 мм з ізоляцією.

Для визначення кривої намагнічування матеріалу магнітопроводу була зібрана експериментальна схема (рис. 2), за допомогою якої отримана ВАХ котушки ($w = 580$ витків) (рис. 3), що розташована на середньому стержні магнітопроводу.

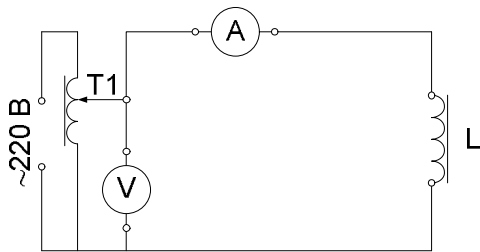


Рис. 2. Експериментальна схема

Активний опір котушки без осердя визначений непрямим методом за цією ж схемою, але на постійному струмі, де живлення від регульованого трансформатора подається через випрямляч на котушку.

З отриманої характеристики за законом Ома визначено активний опір котушки $R = 3,3$ Ом.

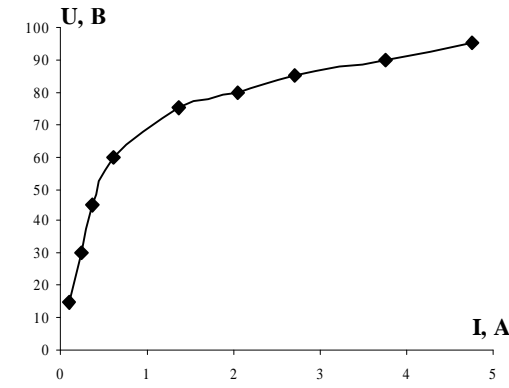


Рис. 3. Вольт-амперна характеристика котушки з осердям

Враховуючи те, що $U_R \ll U$, можна вважати, що магнітний потік дорівнює:

$$\Phi = \frac{U}{2\pi f w}, \quad (3)$$

де w – кількість витків котушки, f – частота мережі (50 Гц).

Розрахунок кривої намагнічування проводився за середніми параметрами B і H , віднесеними до всього магнітного кола (табл. 1). Безумовно, отримана таким чином крива намагнічування може відрізнятися від дійсної.

Виходячи з того, що потік розсіювання $\Phi_{роз} \ll \Phi_{осн}$, цією величиною при розрахунку можна знехтувати, а активний опір проводу котушки можна врахувати, хоча активна складова значно менша реактивної складової напруги. Магнітний потік розподіляється по всій довжині магнітопроводу. Індукцію можна визначити для кожної ділянки магнітопроводу за формулою:

$$B_k = \frac{\Phi}{S_k}, \quad (4)$$

де S_k – площа перерізу магнітопроводу відповідної ділянки k .

За другим законом Кірхгофа для магнітних кіл МРС визначається як

$$F = \sum_{k=1}^n H_k l_k = I w. \quad (5)$$

де k – ділянка магнітопроводу; H_k – напруженість k -ої ділянки магнітопроводу; l_k – довжина відповідної k -ої ділянки магнітопроводу.

Розбиття обраного магнітопроводу на відповідні ділянки вказано на рис. 4.

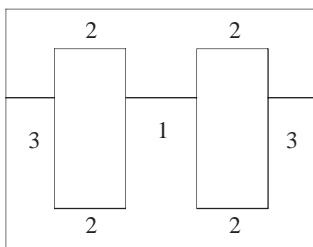


Рис.4. Розподіл магнітопроводу на ділянки

Результати розрахунків наведені в таблиці, де середню напруженість $H_{\text{сеп}}$ визначено за формулою (5), як $H_{\text{сеп}} = \frac{F}{\sum_{k=1}^n l_k}$. Індукція $B_{\text{сеп}}$ – визначена за формулою (4) для кожної ділянки та взята, як середня.

Таблиця 1 – Вихідні та розрахункові данні кривої намагнічування

I, A	U, B	F, A	$H_{\text{сеп}}, A/m$	$\Phi, Bб$	$B_1, Tл$	$B_2, Tл$	$B_3, Tл$	$B_{\text{сеп}}, Tл$
0,1	15	58	414,2857	$8,2322 \cdot 10^{-05}$	0,286	0,208	0,254	0,249
0,25	30	145	1035,714	$1,6464 \cdot 10^{-04}$	0,572	0,416	0,508	0,499
0,375	45	217,5	1553,571	$2,4696 \cdot 10^{-04}$	0,858	0,624	0,762	0,748
0,61	60	353,8	2527,143	$3,2929 \cdot 10^{-04}$	1,143	0,832	1,016	0,997
1,375	75	797,5	5696,429	$4,1161 \cdot 10^{-04}$	1,429	1,039	1,27	1,246
2,05	80	1189	8492,857	$4,3905 \cdot 10^{-04}$	1,524	1,109	1,355	1,329
2,7	85	1566	11185,71	$4,6649 \cdot 10^{-04}$	1,62	1,178	1,440	1,413
3,75	90	2175	15535,71	$4,9393 \cdot 10^{-04}$	1,715	1,247	1,524	1,496
4,75	95	2755	19678,57	$5,2137 \cdot 10^{-04}$	1,81	1,317	1,609	1,579

За отриманими розрахунками побудована крива намагнічування сталевго магнітопроводу, яка наведена на рис. 5, на цьому ж рисунку наведена також крива намагнічування з урахуванням активного опору обмотувального проводу котушки.

З діаграми видно, що незначний розбіг між кривими знаходиться у зоні насичення сталі. Можна зробити висновок, що урахування активного падіння напруги не обов'язкове в даному випадку. Перевірку побудованої кривої було зроблено графоаналітичним способом. Для індукцій B_k визначені H_k за графіком та за формулою (5) і зроблена оцінка погрішності F .

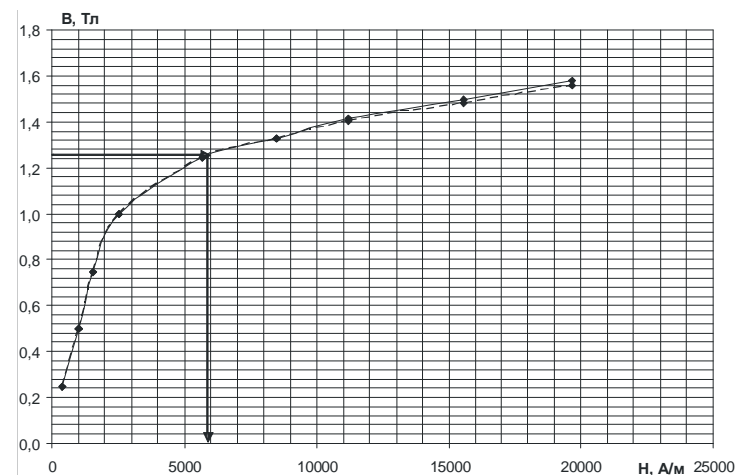


Рис. 5. Криві намагнічування для магнітопроводу,
— — крива з урахуванням активного падіння напруги на проводі,
— — без урахування падіння напруги

Маючи криву намагнічування та геометрію магнітопроводу можна за допомогою математичного пакету *FEMM* зробити модель досліджуваного об'єкту для подальшого її розрахунку та аналізу. Розрахунок магнітного поля моделі проводиться через розв'язання рівнянь Максвелла [2, 3]:

$$\text{rot } H = J; \quad (6)$$

$$\text{div } B = 0; \quad (7)$$

$$B = \mu H, \quad (8)$$

методом кінцевих елементів.

Програма *FEMM* проводить розрахунок поля, задовольняючи рівнянням (6)-(8) через векторний потенціал: $B = \text{rot } A$.

Діаметр середнього стержня можна перерахувати як:

$$d_{\text{сеп}} = \frac{2a}{\sqrt{p}},$$

де a – сторона внутрішнього реального квадратного стержня.

Таке перетворення надає можливість побудови геометричної моделі у препроцесорі *FEMM* для подальшого розв'язання задачі у осісиметричній постановці (рис. 6).

Для перевірки достовірності були проведені додаткові дослідження. При введенні в магнітне коло означеного магнітопроводу повітряних проміжків різної величини була експериментально знята ВАХ. Відповідно, була розрахована ВАХ магнітної системи по програмі *FEMM* (рис. 7), в яку вводилась крива намагнічування визначена по середнім параметрам.

Було встановлено, що такий підхід дає доволі близькі результати та мо-

же бути запропонований для тих випадків, коли немає можливості визначити криву намагнічування матеріалу осердя. Викладений вище метод дозволяє провести подальший аналіз у математичному пакеті моделювання *FEMM*.

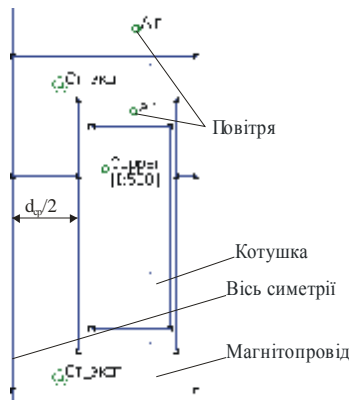


Рис. 6. Геометрична модель магнітної системи, відтворена у процесорі *FEMM*

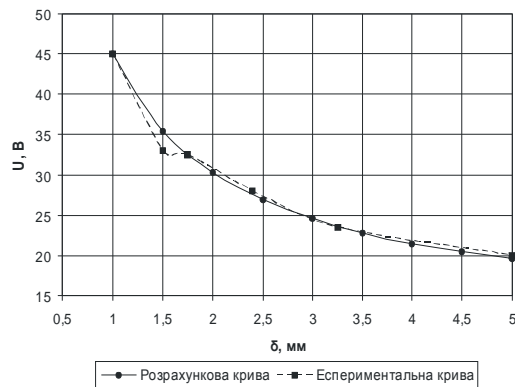


Рис. 7. Експериментальна та розрахункова ВАХ при струмі 1,5 А з різними зазорами

Список літератури: 1. Данько В.Г., Гончаров Є.В. Вибір еквівалентної моделі для розрахунку надпровідникового обмежувача струму // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Энергосберегающие технологии и оборудование. – Харьков: Технологический центр, 2007 – № 3/3 (27). – С. 3-7. 2. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. Пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 336 с. 3. David Meeker Finite Element Method Magnetics Version 4.2: User's Manual. – 2006 – 155 p.

Поступила до редколегії 23.05.08

УДК 621.316.925

Ю.С. ГРИЩУК, канд. техн. наук,
А.Е. ВИШНЕВСКИЙ,
С.Ю. ГРИЩУК,
А.Н. РЖЕВСЬКИЙ
А.І. КУЗНЕЦОВ

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА АТМЕГА16 ПРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ШВИДКОДІЮЧИХ ЗАПОБІЖНИКІВ

Розглянуто структурну схему автоматизованої системи керування технологічним процесом досліджень швидкодіючих запобіжників на базі мікроконтролера Atmega16, алгоритми роботи схеми й розрахунку їх захисних і комутаційних характеристик, алгоритм обробки результатів і побудови багаторфакторних математичних моделей.

Рассмотрена структурная схема автоматизированной системы управления технологическим процессом исследований быстродействующих предохранителей на базе микроконтроллера Atmega16, алгоритмы работы схемы и расчета их защитных и коммутационных характеристик, алгоритм обработки результатов и построения многофакторных математических моделей.

Вступ. У процесі розробки й проектування швидкодіючих запобіжників виникає необхідність за заданими значеннями захисних характеристик і параметрів електричного кола визначити необхідні геометричні й конструктивні параметри плавкого елемента. Для розв'язання цього завдання необхідно одержати аналітичні залежності, що зв'язують характеристики запобіжників з геометричними й конструктивними параметрами плавкого елемента й параметрами електричного кола. Найбільш ефективно розв'язання цього завдання може бути отримане на основі математичної теорії планування експерименту.

При проведенні досліджень на основі математичної теорії планування експерименту об'єкт дослідження зручно подавати в вигляді кібернетичної системи, що в [1] називають "чорним ящиком". Для проведення експерименту необхідно мати можливість впливати на поведінку "чорного ящика". Всі способи такого впливу називаються факторами або "входами чорного ящика" [1, 2]. Характеристики цілей дослідження називають виходом "чорного ящика", цільовою функцією або відгуком.

При розв'язанні завдань на основі математичної теорії планування експерименту використовуються різні математичні моделі.

Згідно [1-4], головною вимогою, висунутою до математичної моделі, є її здатність передбачати з необхідною точністю результати експерименту в досліджуваній області. Досить важливою вимогою є простота моделі.

Метою роботи є розробка структурної схеми автоматизованої системи