

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.О. КУЗЬМІН

МУЛЬТИФИЗИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРОМАГНІТАХ І АКТУАТОРАХ ВАКУУМНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ З УРАХУВАННЯМ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

У статті запропонована удосконалена методика мультифізичного комп'ютерного моделювання зв'язаних процесів у конструктивних елементах вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги з урахуванням контактних явищ. У конструкціях сучасних вакуумних автоматичних вимикачів і контакторів спостерігається значне використання електромагнітних актуаторів на основі висококоерцитивних магнітотвердих рідкоземельних композиційних матеріалів NdFeB і SmCo. Найбільш перспективними для використання в якості приводів автоматичних вимикачів і контакторів є поляризовані електромагніти на основі використання зазначених висококоерцитивних постійних магнітів. Однак існуючі серійні конструкції електромагнітів і актуаторів необхідно суттєво вдосконалити з метою підвищення надійності і терміну експлуатації, зниження масогабаритних і вартісних показників, подальшого зниження енергоспоживання, вдосконалення технологічності процесу масового виробництва. Комп'ютерне моделювання запропоновано виконувати методом скінченних елементів у двовимірній постановці з використанням комерційних програмних продуктів і (або) програмного забезпечення, створеного безпосередньо для проведення зазначених досліджень. Одним із пріоритетних напрямків удосконалення математичних моделей і алгоритмів комп'ютерного моделювання процесів у механічному колі вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги є врахування контактної взаємодії конструктивних елементів апаратів, що розглядаються. Наступним кроком, завдяки використанню вдосконаленої математичної моделі, є виконання комплексу розрахункових досліджень і на основі отриманих чисельних результатів розробка рекомендацій, спрямованих на створення конструкцій електромагнітів і актуаторів, які б відповідали світовим стандартам і були конкурентоспроможними на світовому ринку.

Ключові слова: Вакуумний автоматичний вимикач, вакуумний контактор, електромагнітний актуатор, математична модель, контактна взаємодія, розрахунок.

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.А. КУЗЬМИН

МУЛЬТИФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТАХ И АКТУАТОРАХ ВАКУУМНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ КОНТАКТНОГО ВЗАЕМОДЕЙСТВИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье предложена усовершенствованная методика мультифизического компьютерного моделирования связанных процессов в конструктивных элементах вакуумных коммутационных аппаратов среднего и высокого напряжения с учетом контактных явлений. В конструкциях современных вакуумных выключателей и контакторов наблюдается значительное использование электромагнитных актуаторов на основе высококоэрцитивных магнитотвердых редкоземельных композиционных материалов NdFeB и SmCo. Наиболее перспективными для использования в качестве приводов автоматических выключателей и контакторов являются поляризованные электромагниты на основе использования указанных высококоэрцитивных постоянных магнитов. Однако существующие серийные конструкции электромагнитов и актуаторов необходимо существенно усовершенствовать с целью повышения надежности и срока эксплуатации, снижения массогабаритных и стоимостных показателей, дальнейшего снижения энергопотребления, совершенствования технологичности процесса массового производства. Компьютерное моделирование предложено выполнять методом конечных элементов в двухмерной постановке с использованием коммерческих программных продуктов и (или) программного обеспечения, созданного непосредственно для проведения указанных исследований. Одним из приоритетных направлений совершенствования математических моделей и алгоритмов компьютерного моделирования процессов в механической цепи вакуумных коммутационных аппаратов среднего и высокого напряжения является учет контактного взаимодействия конструктивных элементов рассматриваемых аппаратов. Следующим шагом, благодаря использованию усовершенствованной математической модели, является выполнение комплекса расчетных исследований и на основе полученных численных результатов разработка рекомендаций, направленных на создание конструкций электромагнитов и актуаторов, соответствующих мировым стандартам конкурентоспособных на мировом рынке.

Ключевые слова: вакуумный автоматический выключатель, вакуумный контактор, электромагнитный актуатор, математическая модель, контактное взаимодействие, расчет.

M.G. PANTELYAT, A.O. KUZMIN

A MULTIPHYSICS MODEL OF PROCESSES IN ELECTROMAGNETS AND ACTUATORS OF VACUUM SWITCHING DEVICES TAKING INTO ACCOUNT CONTACT INTERACTION OF STRUCTURAL ELEMENTS

The purpose of the work is to improve mathematical models and algorithms of computer modelling of multiphysics processes in electromagnets and actuators of vacuum switching devices by taking into account the contact interaction of structural elements when changing their stress-strain state. In the design of modern vacuum circuit breakers and contactors there is a significant use of electromagnetic actuators based on high-coercive hard magnetic rare earth composite materials NdFeB and SmCo. The most promising for use as drives of circuit breakers and contactors are polarized electromagnets based on the use of these high-coercive permanent magnets. However, the existing serial designs of electromagnets and actuators need to be significantly improved in order to increase reliability and service life, reduce weight and cost, further reduce energy consumption, improve the manufacturability of the mass production process. Computer simulation is proposed to be performed by the Finite Element Method in 2D formulation using commercial software products and/or software created directly for these investigations. One of the priority areas for improving mathematical models and algorithms for computer modelling of processes in the mechanical circuit of vacuum switching devices of medium and high voltage is to take into account the contact interaction of the structural elements of the devices under consideration. The next step, thanks to the use of an advanced mathematical model, is to perform a set of computational research and based on the obtained numerical results to develop recommendations aimed at creating designs of electromagnets and actuators that would meet world standards and be competitive in the world market.

Keywords: vacuum circuit breaker, vacuum contactor, electromagnetic actuator, mathematical model, contact interaction, calculation.

Вступ. Вакуумні автоматичні вимикачі для мереж середньої та високої напруги займають домінуючі позиції у відповідному сегменті ринку комутаційних апаратів, а в сегменті ринку контакторів середніх напруг частка вакуумних апаратів перевищує 90% [1-3]. Такий перерозподіл ринку обумовлено унікальними ізоляційними і дугогасними властивостями вакууму, а також успіхами в розвитку вакуумної комутаційної техніки останнім часом.

В конструкціях сучасних вакуумних автоматичних вимикачів і контакторів знайшли широке застосування електромагнітні актуатори на основі висококоерцитивних магнітотвердих рідкоземельних композиційних матеріалів NdFeB і SmCo. Аналіз різноманітних конструктивних рішень актуаторів [1, 2, 4] свідчить про те, що найбільш перспективними в якості приводів автоматичних вимикачів і контакторів є поляризовані електромагніти на основі використання зазначених висококоерцитивних постійних магнітів. У поєднанні з мікропроцесорними системами управління та електролітичними конденсаторами це дозволяє створити вакуумні комутаційні апарати з електромагнітними приводами, які можуть забезпечувати необхідні силові характеристики, практично не споживаючи при цьому енергію від зовнішніх джерел після виконання операцій вмикання і вимкання.

У той же час, як показує виконаний аналіз [1, 2, 4], існуючі серійні конструкції електромагнітів і актуаторів потребують суттєвого вдосконалення, спрямованого на підвищення надійності і терміну експлуатації, зниження масогабаритних і вартісних показників, подальше зниження енергоспоживання, вдосконалення технологічності процесу масового виробництва.

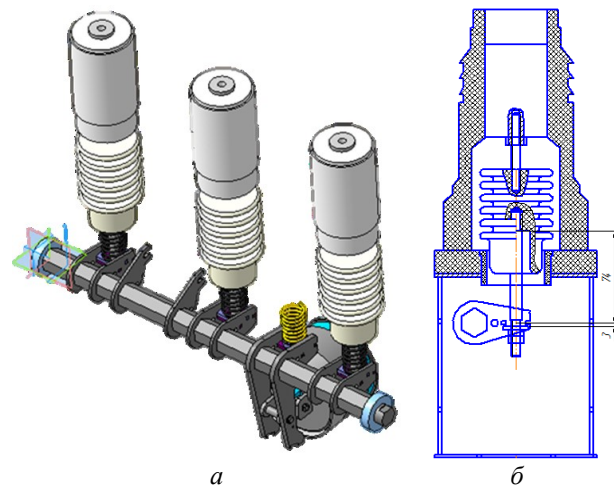
Для досягнення цієї мети потрібно вдосконалити розроблені раніше [1, 2, 4] математичні моделі мультифізичних процесів, що мають місце в електромагнітах і актуаторах з висококоерцитивними постійними магнітами, на базі рівнянь електромагнітного поля, рівнянь руху та теорії пружності з урахуванням нелінійних процесів в електричному і механічному колах вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги. Далі, з використанням вдосконаленої моделі потрібно виконати комплекс розрахункових досліджень і на основі отриманих чисельних результатів розробити рекомендації, спрямовані на створення конструкцій електромагнітів і актуаторів, які б відповідали світовим стандартам і були конкурентоспроможними на світовому ринку.

Одним із доцільних напрямків удосконалення математичних моделей і алгоритмів комп'ютерного моделювання процесів у механічному колі вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги є врахування контактної взаємодії конструктивних елементів апаратів, що розглядаються. З цією метою, розроблені та апробовані [1, 2, 4] математичні моделі мультифізичних процесів, що мають місце в електромагнітах і актуаторах з висококоерцитивними постійними магнітами, на базі рівнянь електромагнітного поля, рівнянь руху та теорії пружності, потрібно доповнити сучасними підходами до чисельного розв'язання контактних задач з використанням методу скінченних елементів [5-7].

Таким чином, **мета роботи** – удосконалення мате-

матичних моделей і алгоритмів комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів шляхом урахування контактної взаємодії конструктивних елементів при зміні їх напружено-деформованого стану.

Деякі приклади конструктивних елементів вакуумних комутаційних апаратів, що розглядаються, наведені на рис. 1 [2].



a – 3D модель з'єднання вакуумних переривників контактора з механічною системою та моностабільним поляризованим електромагнітом; *б* – креслення положення тяги контактної пружини у вимкненому та ввмкненому стані вакуумного контактора

Рис. 1. Приклади конструктивних елементів комутаційних апаратів, що розглядаються [2]

Математична модель електромагнітних процесів. Розподіл нестационарного електромагнітного поля у просторі та часі у загальному випадку описується системою рівнянь Максвелла у диференціальній формі [1, 8, 9]. Оскільки у вакуумних комутаційних апаратах струми зсуву відсутні, потрібно розв'язувати наступну підсистему рівнянь Максвелла з урахуванням лише струмів провідності [1, 8, 9]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J}; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля; \mathbf{B} – вектор індукції магнітного поля; \mathbf{E} – вектор напруженості електричного поля; \mathbf{J} – вектор щільності струмів провідності.

Система рівнянь (1) доповнюється так званими матеріальними рівняннями, які визначають електрофізичні властивості матеріалів [1, 8, 9]:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H}; \\ \mathbf{J} &= \gamma \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (2)$$

де μ – магнітна проникність матеріалу; γ – питома електрична провідність матеріалу.

У [1] наведена система рівнянь, отримана з (1), (2) з урахуванням наступних особливостей конструкцій електромагнітів і актуаторів вакуумних комутаційних апаратів:

– наявність постійних магнітів у конструкціях, що розглядаються;

– рух середовища, в якому розраховується електромагнітне поле.

Комп'ютерне моделювання розподілу електромагнітного поля конструктивних елементів вакуумних комутаційних апаратів доцільно розпочати у циліндричній системі координат у двовимірній вісьосиметричній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів). Розрахунок електромагнітного поля доцільно виконувати з використанням векторного магнітного потенціалу A , який визначається виразом [1, 8, 9]

$$\mathbf{B} = \text{rot } A \quad (3)$$

та на відміну від векторів \mathbf{H} і \mathbf{B} має лише одну (а не дві) просторову компоненту $A(r,z,t) = A_\varphi(r,z,t)$. При цьому робиться припущення, що вектор щільності струмів провідності \mathbf{J} також має лише одну відповідну компоненту.

Відповідні рівняння, що описують розподіл $A(r,z,t) = A_\varphi(r,z,t)$ у просторі та у часі, розв'язуються чисельно методом скінченних елементів з відповідними початковими та граничними умовами [1].

Розрахунок напружено-деформівного стану конструктивних елементів. Розрахунок пружного напружено-деформівного стану виконується шляхом розв'язання рівнянь теорії пружності у вигляді рівнянь Ляме [10]

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \cdot \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + \mu \cdot \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} - K \cdot \nabla \cdot T, \quad (4)$$

де ρ – щільність матеріалу; \mathbf{u} – вектор переміщень; λ , μ – коефіцієнти Ляме; \mathbf{F} – вектор об'ємних сил (у тому числі, електромагнітні сили, що прикладені до елемента конструкції та змінюються у часі);

$K = \frac{\alpha \cdot E}{1 - 2 \cdot \nu}$ – коефіцієнт, що враховує зміну об'ємних сил у випадку нагрівання; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності; α – коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу.

Рівняння (4) в загальному випадку описує хвильові механічні процеси в твердих тілах. Оскільки процес пружного деформування конструкцій, що розглядаються в статті, є квазістатичним, рівняння (4) розв'язується у спрощеній формі, наведеній у [1, 10].

Можливий також альтернативний запис математичної моделі напружено-деформівного стану з використанням рівнянь у тензорній формі [6, 10]

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,i} + f_j &= 0, \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \end{aligned} \quad (5)$$

де σ_{ij} – тензор механічних напруг; ε_{ij} – тензор механічних деформацій; \mathbf{u} – вектор переміщень; \mathbf{f}_i – вектор об'ємних сил; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності; δ_{ij} – дельта-функція Кронеккера; $e = e_{kk}$.

Більш детальний опис зазначеного варіанта математичної моделі напружено-деформівного стану наведено в [6, 10].

Комп'ютерне моделювання контактної взаємодії конструктивних елементів. Урахування контактної взаємодії конструктивних елементів при зміні їх напружено-деформівного стану пропонується виконати шляхом використання відповідних математичних моделей та чисельних алгоритмів на основі метода скінченних елементів, реалізованих у [7] або детально описаних у [5, 6]. Важливо підкреслити, що зазначені методи орієнтовані також на розв'язання термоконтактних задач, тобто дозволяють комп'ютерне моделювання процесів нестационарного теплообміну в зонах механічного контакту [1, 5, 6].

Особливістю підходу, запропонованого в [5], є використання для розв'язання двовимірних задач спеціального одновимірного скінченного елемента, який не має товщини. Відмінною рисою та перевагою цього скінченного елемента є те, що він при наявності тертя "відстежує" історію навантаження, тобто момент (крок за часом) вступу точки, що розглядається, в контакт, і напрямок її прослизання. На рис. 2, 3 наведена графічна інформація [5, 6], що дає загальне уявлення стосовно особливостей та складності методики.

Вибір метода врахування контактної взаємодії конструктивних елементів буде зроблено в процесі безпосереднього проведення чисельних розрахунків.

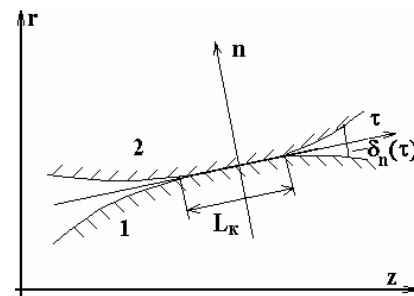


Рис. 2. Довжина контакту L_k і зазор δ_n між тілами 1 і 2, що контактують [5]

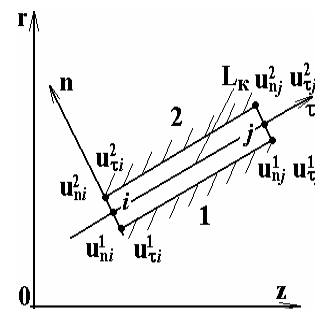


Рис. 3. Вузлові переміщення контактної поверхні [5]

Мультифізичне комп'ютерне моделювання зв'язаних процесів у конструктивних елементах комутаційних апаратів пропонується виконувати методом скінченних елементів на основі алгоритмів, розроблених і детально викладених у [1, 11], із доданням чисельного аналізу контактних явищ. Слідуючи [1, 11], доцільним може бути також розв'язання рівнянь теплопровідності та моделювання процесів у відповідних електричних ланцюгах і електронних схемах керування.

Висновки. Запропонована удосконалена методика мультифізичного комп'ютерного моделювання зв'язаних процесів у конструктивних елементах ваку-

умних комутаційних апаратів середньої та високої напруги з урахуванням контактних явищ. Чисельні розрахунки доцільно виконувати методом скінченних елементів у двовимірній постановці з використанням комерційних програмних продуктів і (або) програмного забезпечення, створеного безпосередньо для проведення зазначених досліджень.

Список літератури:

1. Байда Є.І. *Мультифізичні моделі високовольтних вакуумних вимикачів з бістабільними поляризованими актуаторами в динамічних режимах: дис... докт. техн. наук: 05.09.01.* Харків, 2018. 376 с.
2. Лелюк М.А. *Удосконалення вакуумних контакторів з мого стабільними поляризованими електромагнітами: дис... канд. техн. наук: 05.09.01.* Харків, 2019. 229 с.
3. <https://new.siemens.com>
4. Baida E.I., Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Pantelyat M.G., Clemens M. Investigations of the dynamics of a bistable electromagnet with improved characteristics for medium voltage vacuum circuit breakers // *Electrical engineering & electromechanics*. 2020. № 3. С. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2020.3.01.
5. Гармаш Н.Г. *Двумерный конечноэлементный анализ контактных задач с учетом теплообмена: дис... канд. техн. наук: 01.02.04.* Харьков, 1999. 163 с.
6. Pantelyat M.G., Doležel I. Finite element technique for solution of thermo-contact problems and its application in numerical analysis of devices working with induction heating // *Electrical engineering & electromechanics*. 2016. № 4. С. 22-27. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.03.
7. <https://www.comsol.ru/video/mechanical-and-thermal-contacts-in-comsol-multiphysics-webinar-ru>.
8. Демирчян К.С. Моделирование магнитных полей. Ленинград: Энергия, 1974. 288 с.
9. Bíró O., Preis K. On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents // *IEEE Transactions on Magnetism*. 1989, v. 25, No. 4. pp. 3145–3159. doi: 10.1109/20.34338.
10. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Москва: Наука, 1979. 560 с.
11. Abba F., Rachek M. Time-stepping FEM-based multi-level coupling of magnetic field-electric circuit and mechanical structural deformation models dedicated to the analysis of electromagnetic actuators // *Actuators*. 2019, v. 8, No. 22. pp. 1-28. doi:10.3390/act8010022.

References (transliterated):

1. Baida E.I. *Multyfizychni modeli vysokovoltnykh vakuumnykh vynykachiv z bistabilnyimi poliaryzovanyimi aktuatoramy v dynamichnykh rezhymakh: dis. ... d-ra tekhn. nauk 05.09.01* [Multiphysical models of high-voltage vacuum circuit breakers with stable polarized actuators in dynamic modes. Dr. eng. sci. diss.]. Kharkiv, 2018. 376 p.
2. Leliuk M.A. *Udoskonaennia vakuumnykh kontaktoriv z moho stabilnyimi poliaryzovanyimi elektromagnitamy: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.09.01* [Improving vacuum contactors with monostable polarized electromagnets. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkiv, 2019. 229 p.
3. <https://new.siemens.com>
4. Baida E.I., Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Pantelyat M.G., Clemens M. Investigations of the dynamics of a bistable electromagnet with improved characteristics for medium voltage vacuum circuit breakers. *Electrical engineering & electromechanics*. 2020, no. 3, pp. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2020.3.01.
5. Garmash N.G. *Dvumernyy konechnoelementnyy analiz kontaktnykh zadach s uchetom teploobmena: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Two-dimensional finite element analysis of contact problems taking into account heat transfer. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkiv, 1999. 163 p.
6. Pantelyat M.G., Doležel I. Finite element technique for solution of thermo-contact problems and its application in numerical analysis of devices working with induction heating. *Electrical engineering & electromechanics*. 2016. No. 4. pp. 22-27. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.03.
7. <https://www.comsol.ru/video/mechanical-and-thermal-contacts-in-comsol-multiphysics-webinar-ru>
8. Demirchyan K.S. *Modelirovanie magnitnykh polej* [Modelling of magnetic fields]. Leningrad: Energy, 1974. 288 p.
9. Bíró O., Preis K. On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents. *IEEE Transactions on Magnetism*. 1989, v. 25, No. 4. Pp. 3145–3159. doi: 10.1109/20.34338.
10. Timoshenko S.P., Goodier J. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1979. 560 p.
11. Abba F., Rachek M. Time-stepping FEM-based multi-level coupling of magnetic field-electric circuit and mechanical structural deformation models dedicated to the analysis of electromagnetic actuators. *Actuators*. 2019, v. 8, No. 22. pp. 1-28. doi:10.3390/act8010022.

Поступила (received) 15.09.21

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пантелейт Михайло Гаррійович (Пантелейт Михаил Гарриевич, Panteliat Mykhailo Garrijovich) – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com.

Кузьмін Артем Олексійович (Кузьмин Артем Алексеевич, Kuzmin Artem Oleksijovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: artyukozmi@gmail.com.