

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"

**Серія: Проблеми удосконалення електричних машин
і апаратів. Теорія і практика**

№ 20 (1063) 2014

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 р.

Харків
НТУ "ХПІ", 2014

Вісник Національного технічного університету "ХПІ".

Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 20 (1063). – 80 с.

Державне видання

Свідцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською і російською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" включено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4. (Бюлетень ВАК України № 6, 2010 р. стор. 3, № 20).

У квітні 2013 р. Вісник НТУ "ХПІ" Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA).

Координаційна рада:

Л.Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І. Сокол, чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; Є.Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В.В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.; В.І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; М.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.

Заступник відповідального редактора: В.Ф. Болюх, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: І.С. Варшамова, асистент.

Члени редколегії: В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; В.І. Мілих, д-р техн. наук, проф.; Сучков Г.М. д.т.н., проф.; Є.І. Сокол, д-р техн. наук, проф., Райнін В.Ю., д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ";

Протокол № 5 від 30.05.2014.

Е.И. БАЙДА, канд. тех. наук, доцент, НТУ "ХПИ"

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА КОНТАКТНОЙ СИСТЕМЫ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ НА СТАТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ ВАКУУМНОГО СИЛЬФОНА

В статье рассмотрено влияние температуры нагрева контактной системы на внутренние напряжения в сильфоне вакуумного выключателя методом конечных элементов. Получена зависимость механических напряжений в материале в функции температуры при заданном ходе контактов. Показано, что наибольшие механические нагрузки испытывают места крепления сильфона к контактам и вакуумной камере. Значения механических напряжений в аварийных режимах работы могут превышать предел текучести при неправильно выбранном материале сильфона.

Ключевые слова: вакуумный сильфон, термомеханические напряжения.

Введение. Как было показано в [1], вакуумные сильфоны в процессе работы подвержены значительным статическим и динамическим нагрузкам [2-5]. О того как материал вакуумного сильфона противостоит этим воздействиям, во многом зависит срок службы и надежность работы выключателя.

Помимо механической деформации, которой подвержен сильфон в процессе движения контактов, на него воздействует также температура, до которой нагрета контактная система выключателя. Согласно [6], эта температура в номинальном режиме достигает $(98-105)^{\circ}\text{C}$, что вызывает дополнительные напряжения в материале сильфона по отношению к статическим и динамическим [7] напряжениям. Так как напряжения в материале сильфона не должны превышать предела текучести, то расчеты такого рода являются достаточно актуальными.

Цель данной статьи – рассчитать дополнительные напряжения, возникающие в материале сильфона вакуумных выключателей в зависимости от температуры нагрева контактной системы, хода подвижных контактов и действия атмосферного давления. Можно предположить, что дополнительные напряжения будут возникать в местах крепления сильфона за счет разности коэффициентов линейного расширения материалов контактов и сильфона.

Основная часть. На рис. 1 показана форма вакуумного сильфона и граничные условия, которые обеспечиваются креплением сильфона к элементам контактной системы.

© Е.И. Байда, 2014

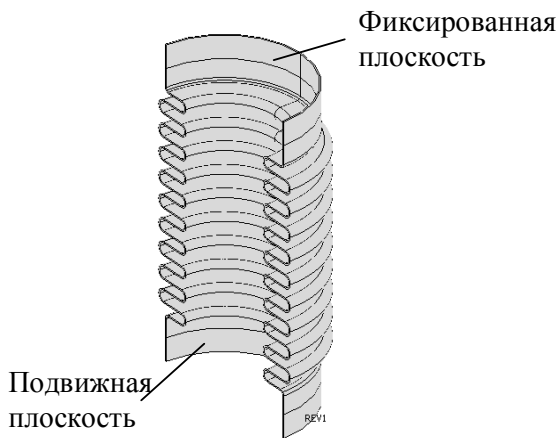


Рис. 1 – Вид половины сиффона

В качестве материалов для сиффонов используются высокопрочные жаростойкие стали с низким содержанием углерода – 08X18H10T, 12X18H10T, 36НХТЮ, 36НХТЮ5М, 40КХНМ и им аналогичные AISI 321 (США), DIN EN 1.4521 (Европа), SUS 321 (Япония). Эти материалы характеризуются значительными модулями упругости – $(1.9 \cdot 10^{11} - 2.2 \cdot 10^{11}) \text{ N/m}^2$ и пределами текучести – $(0.8 \cdot 10^9 - 2.5 \cdot 10^9) \text{ N/m}^2$. Расчет проводился для стали 36НХТЮ с пределом текучести равным $1.0 \cdot 10^9 \text{ Па}$ и модулем упругости $2.0 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.

Механические напряжения вычислялись при максимального значении хода контактов равном 8,7 мм с учетом атмосферного давления, действующего на сиффон.

Система уравнений при отсутствии внутренних объемных сил в Декартовой системе координат:

$$(\lambda + G) \cdot \frac{\partial e}{\partial x_i} + G \cdot \nabla^2 u_i - \frac{\alpha \cdot E}{1 - 2 \cdot \nu} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (1)$$

где λ , G - параметры Ламе; e – относительное удлинение по координатам; u - перемещение; α - температурный коэффициент; T – температура нагрева; E , ν - модуль упругости и коэффициент Пуассона, $i=1..3$.

Граничные условия:

- атмосферное давление, действующее на внешнюю поверхность сиффона;
- фиксация верхней границы;

- фиксированное значение хода нижней границы.

Расчет проводился в системе Comsol Multiphysics - 3.5. Результаты расчета напряжений в гофрированной части сильфона (за исключением плоскостей крепления), приведены на рис.2.

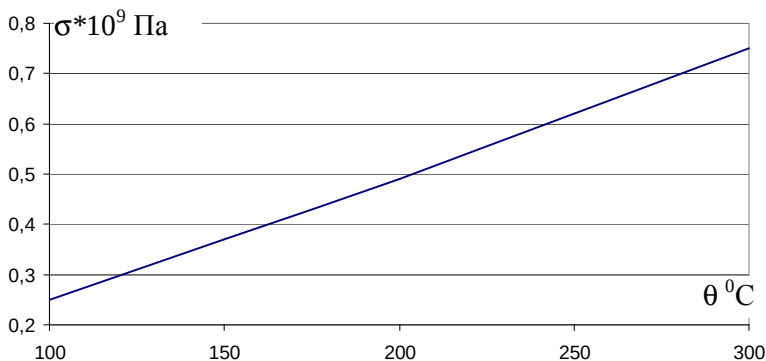


Рис. 2 – Зависимость напряжений в гофрированной части сильфона от температуры

Как видно из рисунка, внутренние напряжения в гофрированной части сильфона пропорциональны температуре и не превышают предел текучести. Особый интерес представляет определение линии локализации максимальных напряжений. На рис.3 показано распределение напряжений при максимальном ходе и температуре нагрева 100°C и 300°C .

Как следует из рис. 3, наибольшие напряжения сосредоточены по линии сопряжения сильфона контактов. Аналогичное положение линии локализации максимальных напряжений (место крепления сильфона) наблюдается и в других случаях. Причем, напряжения в области крепления определяются только температурой. Необходимо отметить, что температура оказывает значительно меньшее влияние на «свободные» области сильфона.

Как можно заметить (рис. 3), область распределения максимальных напряжений невелика по размерам и в меньшей степени подвержена циклическим нагрузкам, чем остальные области сильфона [7].

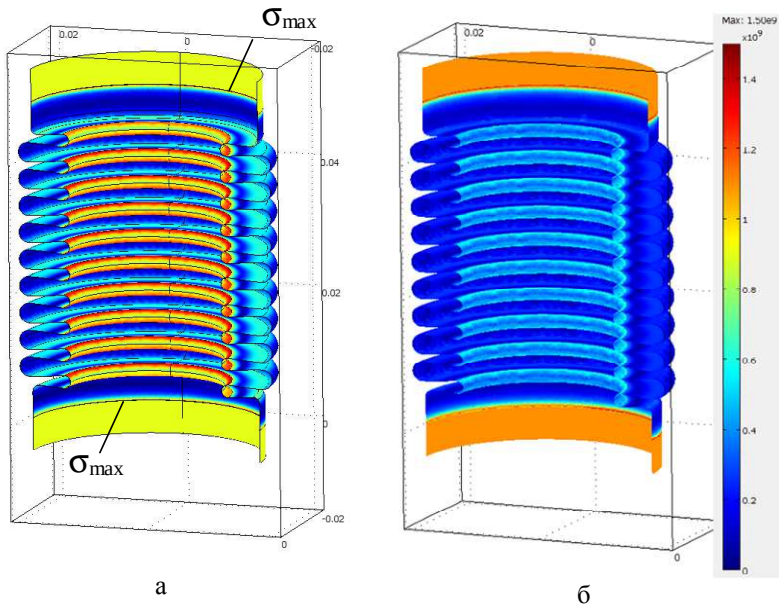


Рисунок 3 – Локализация максимальных напряжений в сиффоне при температуре нагрева: а – 100 °С; б – 300 °С.

Расчеты показывают, что максимальные напряжения в области крепления сиффона также растут пропорционально температуре и в случае нагрева контактов и сиффона до температуры 300 °С (допустимая температура нагрева при протекании аварийного сверхтока), напряжения превышают предел текучести выбранного материала в полтора раза ($\sigma_{\max} = 1.5 \cdot 10^9$ Па).

Выводы. На основании решения уравнений (1) теории упругости [8, 9] рассчитано распределение напряжений в материале вакуумного сиффона. Из результатов решения следует: в номинальном режиме температурные напряжения соизмеримы со статическими и динамическими напряжениями деформации сиффона (рис.1); в аварийных режимах работы (температура нагрева 300 °С и выше) температурные напряжения в местах крепления сиффона могут превышать предел текучести материала.

Список литературы: 1. Байда Е.И. Расчет статической деформации сиффона вакуумных выключателей средних напряжений // Электротехника и электромеханика – Харьков, 2011. – №6. С. 15-16. 2. Сиффоны. Расчет и проектирование. Под ред. Л.Е. Андреев

вой. М., "Машиностроение", 1975. – 156 с. **3. Якушев В.Л.** Нелинейные деформации и устойчивость тонких оболочек. М.: Наука, 2004. **4. Ильичев В.А.** Исследование влияния формы сильфонов на долговечность: диссертация кандидата технических наук: 05.02.02 Ленинград, 1981, 188 с. **5. Полубояринова И.А.** Математические модели, методы и алгоритмы проектирования оболочек сильфонного типа специального назначения: диссертация кандидата технических наук: 05.13.12 Санкт-Петербург, 2003, 166 с. **6. Ткаченко С.А.** Оценка температуры контактной системы вакуумных камер // Ткаченко С.А., Жаворонков М.А. / Электротехника – Москва, 2010. – №11. С. – 32-35. **7. Байда Е.И.** Расчет динамической деформации сильфона вакуумных выключателей средних напряжений // Электротехника и электромеханика – Харьков, 2012. – №1. С. 15-18. **8. Френкель Я.И.** Курс теоретической механики. – Ленинград: Типография "Красный печатник", 1939. – 386 с. **9. Тимошенко С.П., Гудьер Дж.** Теория упругости: Пер. с англ. / Под редакцией Шаниро Г.С. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 560 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bajda, E.I. "Расчет статической деформации сильфона вакуумных выключателей средних напряжений." *Electrical Engineering & Electromechanics* 6 (2011): 15-16. Print. 2. Bellows. Calculation and Design. Editor L.E. Andreeva. Moscow, "Machine Building", 1975. 156 p. Print. 3. Jakushev V.L. *Nelinejnye deformacii i ustojchivost' tonkih obolochek*. Moscow: Nauka, 2004. Print. 4. Iljichev V.A. *Issledovanie vlijaniya formy sil'fonov na dolgovechnost'*. Dis. ... kand. tech. nauk. Leningrad, 1981. Print. 5. Polubojarinova I.A. *Matematicheskie modeli, metody i algoritmy proektirovanija obolochek sil'fonnogo tipa special'nogo naznachenija: Dis. ... kand. tech. nauk*. St-Petersburg, 2003. Print. 6. Tkachenko, S.A., Zhavoronkov, M.A. "Ocenka temperatury kontaktnoj sistemy vakuumnih kamer". *Jelektrotehnika* 11: 32-35. Print. 7. Bajda E.I. "Calculation of dynamic deformation of an intermediate voltage vacuum switch bellow". *Electrical Engineering and Electromechanics* 1 (2012): P. 15-18. Print. 8. Frenkel Ja.I. *Theoretical Mechanics*. Leningrad: Krasny Pechatnik, 1939. Print. 9. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill, 1970. Print.

Поступила (received) 28.04.2014

Ю.С. ГРИЩУК, канд. техн. наук, проф. НТУ "ХПІ"
С.Л. ЗУЄНКО, студент, НТУ "ХПІ"

АНАЛІЗ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ТЕРМІНАЛУ ШАФИ КЕРУВАННЯ ОБІГРІВОМ ТУНЕЛІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Проведено аналіз функцій мікропроцесорного терміналу, розглянуті особливості роботи чотирьох аналогових струмових входів та чотирьох аналогових входів напруги пристроїв 7SJ624 і 7SJ64. Викладені особливості дискретних входів і виходів послідовних інтерфейсів. Розглянуто окремий сервісний інтерфейс для обліку даними з віддаленим центром через персональний комп'ютер та послідовний системний інтерфейс для роботи з різними протоколами і передачі даних в центральну систему контролю та керування.

Ключові слова: мікропроцесорний термінал, шафа керування, мікроконтролер.

Вступ. Обігрів тунелів є однією з важливих умов надійної роботи метрополітену. Для забезпечення обігріву використовуються потужні інфрачервоні обігрівачі. Саме тому керування постачанням електричної енергії до обігрівачів є доволі важливим питанням як з економічного боку, так і з боку безпеки пасажирів метрополітену. Одним з таких комплектних розподільчих пристроїв є шафа керування обігрівом тунелів метрополітену. Надійність цього пристрою є доволі важливою, так як від цієї надійності залежить працездатність керованих ним обігрівачів, від роботи яких можуть залежати не тільки умови виконання певної роботи в тунелі, але і людське життя.

Керування роботою обігрівачів забезпечується мікропроцесорним терміналом шафи керування SIEMENS SIPROTEC, 7SJ62/64 – багатофункціональним пристроєм захисту та місцевого керування.

Метою даної роботи є огляд, аналіз та виявлення переваг та недоліків мікропроцесорного терміналу шафи керування.

Аналіз мікропроцесорного терміналу. Пристрої SIPROTEC 7SJ62/64 є цифровими багатофункціональними пристроями захисту і керування, які працюють на базі потужного мікропроцесора. Усі функціональні завдання виконуються виключно цифровим методом, починаючи від збору вимірюваних значень і закінчуючи формуванням керуючих команд до вимикача. На рис. 1 представлена загальна структура пристроїв 7SJ62 і 7SJ64. Крім обробки вимірюваних значень, мікропроцесорна система (МП) також виконує поточні функції захисту і керування. Це, головним чином, включає в себе наступне:

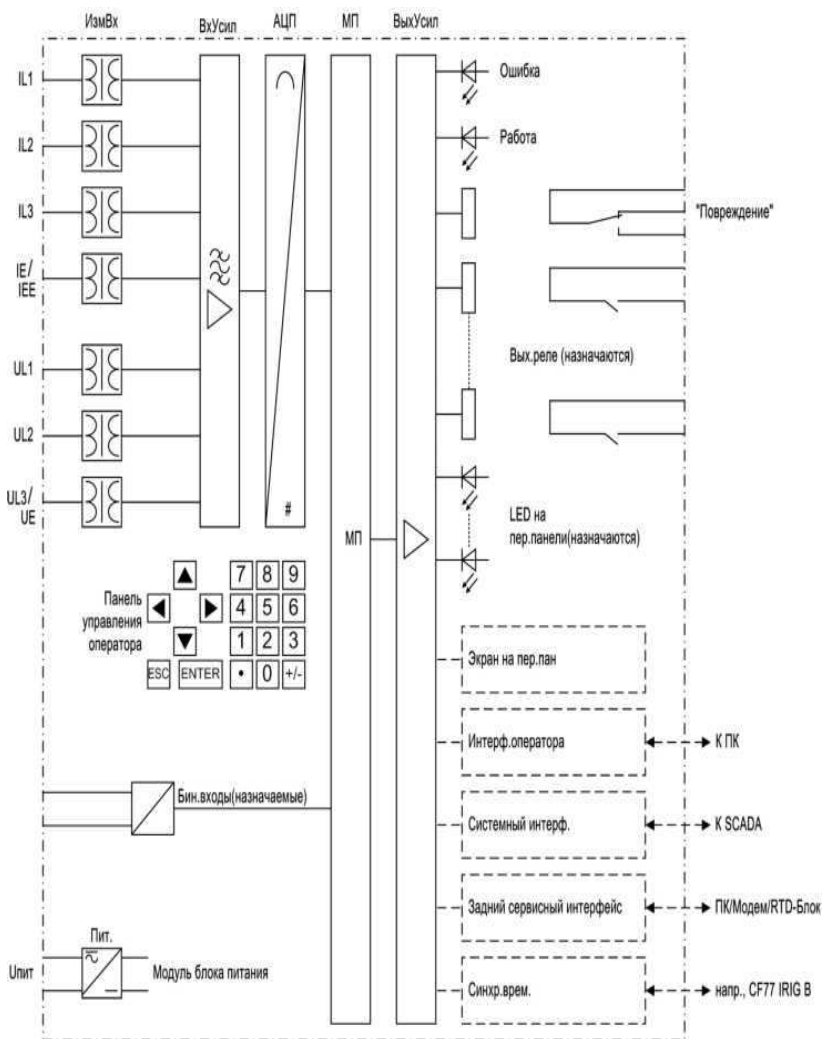


Рис. 1 – Загальна структура пристроїв 7SJ62 і 7SJ64.

- Фільтрація та підготовка вимірюваних величин до обробки;
- Безперервний контроль вимірюваних величин;
- Контроль умов спрацьовування окремих функцій захисту;
- Опитування граничних значень і послідовностей у часі;
- Управління сигналами для логічних функцій;
- Формування вихідних команд для комутаційних пристроїв.
- Запис повідомлень, даних і величин ушкоджень для проведення

подальшого аналізу;

- Управління операційною системою і відповідними функціями, такими, як реєстрація даних, управління годинником реального часу, процесом обміну даними, а також інтерфейсами і таке інше;

- Інформація видається через вихідні підсилювачі.

На основі аналізу матеріалів викладених в [1-6] виявлено, що при застосуванні мікропроцесорних пристроїв релейного захисту (МПРЗ) в даній шафі керування ми можемо отримати набагато менші габарити ніж при застосуванні електромеханічних реле захисту (ЕМРЗ) [1].

Також розглянуті питання про достовірність наступних тверджень про те, чи:

- надійність напівпровідникових реле на дискретних компонентах вище надійності електромеханічних реле;
- надійність напівпровідникових пристроїв захисту на основі інтегральних мікросхем з високим ступенем інтеграції вище, ніж надійність пристроїв на дискретних електронних компонентах;
- надійність мікропроцесорних реле вище надійності електронних не мікропроцесорних пристроїв [1, 2].

Аналіз особливостей самодіагностики.

Аналогові входи. Вимірювальні входи перетворюють сигнали по струмах і напругах, отримані від вимірювальних трансформаторів, і приводять їх до рівня, на якому здійснюється обробка даних сигналів у пристрої. У пристрої передбачено 4 струмових входів. Залежно від моделі, пристрій також має три або чотири входи напруги. Три струмових входів служать для підведення фазних струмів. Залежно від моделі, четвертий струмовий вхід може використовуватися для вимірювання струму замикання на землю (підведеного від спільної точки обмоток ТТ, з'єднаних в зірку) або для підведення струму замикання на землю від окремого ТТ (чутливий вхід струму замикання на землю та визначення напрямку замикання на землю).

Входи напруги можуть використовуватися або для вимірювання трьох фазних напруг або двох міжфазних напруг. Можливо також підключення двох міжфазних напруг в "розімкнутий трикутник".

Чотири входи напруги пристроїв 7SJ624 і 7SJ64 можуть використовуватися як для підведення трифазних напруг і однієї напруги зсуву від обмотки, з'єднаної в розімкнутий трикутник, так і для подачі іншої напруги для функції синхронізації.

Аналогові вхідні величини подаються на вхідні підсилювачі. На вхідному підсилювачі забезпечується високоомне обмеження аналогових вхідних величин. Воно забезпечується фільтрами, налаштованими на обробку вимірюваних величин з урахуванням необхідної смуги пропускання частот і необхідної швидкодії.

Аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Цей пристрій перетворює вхідний аналоговий сигнал із трансформаторів струму і напруги у двійковий код, який передається через спеціальні фільтри на обробку в мікропроцесорну систему. Всі АЦП працюють шляхом вибірки вхідних значень через фіксовані інтервали часу й у такий спосіб перетворюють синусоїдальний сигнал у набір фіксованих амплітуд. Деякі сучасні АЦП є складні і навіть містять у собі мікропроцесор, який керує їхньою роботою. АЦП є головним вузлом вимірювального пристрою і йому як і будь-якому складному вимірювальному пристрою властиві різні погрішності і помилки перетворення вхідної величини. Оскільки вхідна величина безупинно змінюється, то це суттєво затрудняє контроль за справністю АЦП і його самодіагностику [1, 2].

Дискретні входи і виходи. Введення / виведення дискретної інформації в мікропроцесор здійснюється через блоки дискретних входів / виходів пристрою. Через дискретні входи в пристрій вводиться інформація від електроустановки (наприклад, про стан комутаційних апаратів) або від інших засобів управління (наприклад, команди заборони або дозволу). Вихідними є, зокрема, команди до комутаційного обладнання та повідомлення, що сигналізують про важливі події і станах.

Елементи лицьової панелі. У пристроях з інтегрованою або виносною панеллю керування інформація, така як повідомлення про події, стани, виміряні значення і функціональний стан пристрою відображається за допомогою світлодіодів (LED) і рідкокристалічного дисплея (РК-дисплея) на лицьовій панелі керування.

Інтегровані цифрові кнопки та кнопки керування спільно з РК-дисплеєм полегшують взаємодію з пристроєм. За допомогою цих елементів забезпечується доступ до всіх даних пристрою, таких як конфігурація і параметри, робочі повідомлення та повідомлення про пошкодження, виміряні значення. За допомогою цих елементів можлива зміна параметрів пристрою.

Крім того, з лицьової панелі керування можливе управління викидачами та іншим обладнанням.

Послідовні інтерфейси. Послідовний інтерфейс оператора на лицьовій панелі призначений для місцевого обміну даними з пристроєм через ПК з використанням програми DIGSI. Це забезпечує зручне управління всіма функціями пристрою.

Окремий сервісний інтерфейс може також бути використаний у пристрої для обміну даними з віддаленим центром через персональний компютер (ПК) з використанням DIGSI. Цей інтерфейс головним чином призначений для дротового підключення пристрою до ПК або для роботи через модем. Сервісний інтерфейс може також використовуватися для підключення RTD-блоків (= resistance temperature detector (резистивний датчик температури)) для введення зовнішньої інформації про температуру (наприклад, для роботи функції захисту від перевантаження).

Додатковий інтерфейс (тільки для 7SJ64) призначений виключно для підключення RTD-блоків (резистивний датчик температури) для введення зовнішньої інформації про температуру.

Всі дані можуть передаватися в центральну систему контролю та керування через *послідовний системний інтерфейс*. Цей інтерфейс може передбачатися для роботи з різними протоколами і варіантами фізичної реалізації схеми передачі для конкретного застосування.

Наступний інтерфейс призначений для синхронізації часу внутрішніх годинників при використанні зовнішніх джерел синхронізації. Додаткові протоколи обміну даними можуть реалізовуватися через додаткові інтерфейсні модулі.

Інтерфейс оператора або сервісний інтерфейс надають можливість керувати пристроями захисту віддалено або місцево, використовуючи стандартний браузер. Зазначене можливо при введенні пристроїв в експлуатацію, при перевірці пристроїв, а також при їх безпосередньому функціонуванні. Для цих завдань використовується стандартне ПЗ SIPROTEC 4 "Веб-монітор".

Висновок. Проведений огляд і аналіз показує, що мікропроцесорний термінал SIEMENS SIPROTEC, 7SJ62/64 володіє багатьма функціями, які вказують на доцільність його використання в системах обігріву тунелів метрополітену та дозволяє значно зменшити габарити шафи керування.

Для підвищення надійності роботи шафи керування та зниження енергоспоживання в ній доцільно застосовувати сучасні високопродуктивні, перешкодостійкі з наднизьким енергоспоживанням 16-ти і 32-

х розрядні мікроконтролери MSP430F фірми Texas Instruments та STR9 компанії ST з потужною аналоговою і цифровою периферією.

Список літератури: 1. Гришук Ю.С. Мікропроцесорні пристрої: Навчальний посібник. – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – 348с. 2. Семейство микроконтроллеров MSP430x1xx. Руководство пользователя: Пер. с англ. – М.: Серия "Библиотека Компэла". ЗАО "КЭмпэл", 2004.– 386. 3. СНиП 32-02-2003 «Метрополитены». Введ. 01.01.2004. 4. Руководство по эксплуатации многофункционального устройства защиты и местного управления Siemens Siprotec. 5. Микропроцессорные гибкие системы релейной защиты / В.В. Михайлов, Е.В. Кириевский, Е.М. Ульяницкий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 240 с. 6. Сташин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 224 с.

Bibliography (transliterated): 1. Grischuk Ju.S. *Microprocessor devices: Manual*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2008. Print. 2. *MSP430x1xx Family. User's Guide*. Texas Instruments: 2006. Print. 3. SNiP 32-02-2003 «Metropoliteny». Vved. 01.01.2004. Print. 4. *Rukovodstvo po jekspluatácii mnogofunkcional'nogo ustrojstva zashhity i mestnogo upravlenija Siemens Siprotec*. Print. 5. *Mihajlov V.V., Kirievskij E.V., Ul'janickij E.M. Mikroprocessornye gibkie sistemy relejnoj zashhity*. – Moscow: Energoatomizdat, 1988. – 240 p. Print. 6. *Stashin V.V., Urusov A.V., Mologonceva O.F. Proektirovanie cifrovych ustrojstv na odnokristal'nyh mikrokontrollerah*. – Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 224 p. Print.

Надійшла (received) 24.04.2014

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, канд. фіз.-мат. наук, ст. викладач, НТУ "ХПІ"

Ю.В. ГУРЕНЦОВ, студент, НТУ "ХПІ"

А.В. ТРОФІМОВ, студент, НТУ "ХПІ"

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ІНДУКТОРІВ ІНДУКЦІЙНИХ КУХОННИХ ПЛИТ

В статті запропонована методика розрахунку індуктора – основного конструктивного елемента індукційної кухонної плити. Представлена в роботі методика розроблена на основі інженерних методів розрахунку плоских індукторів промислових індукційних нагрівачів з урахуванням особливостей та режимів роботи індукційних кухонних плит. Виконано розрахунки індукторів стосовно до ряду режимів нагрівання посуду різних геометричних розмірів. Проаналізовано отримані результати.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, індуктор, розрахунок.

Вступ. Індукційні плити являють собою відносно новий клас сучасної електропобутової техніки – кухонні електричні плити, які розігрівають металевий посуд вихровими струмами, які створюються електромагнітним полем частотою 20-100 кГц [1-4]. Останнім часом такі плити отримують все більш широке використання. Конструкції сучасних індукційних плит різних виробників наведені на рис. 1. Представляє значний інтерес дослідження електромагнітних і теплових процесів, що протікають в індукційних плитах в процесі їх експлуатації, а також розробка методик розрахунку і проектування їх конструктивних елементів. Розроблена методика та отримані результати мають бути розраховані на використання в практиці конструювання побутових індукційних плит, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з відповідного напрямку.



Рис. 1 – Сучасні індукційні кухонні плити:
а – одноконфорочная; б – двухконфорочная.

Основним вузлом індукційної кухонної плити є індуктор – пласка одновиткова або багатовиткова котушка, при протіканні по якій

© М.Г. Пантелят, Ю.В. Гуренцов, А.В. Трофімов, 2014

змінного струму створюється електромагнітне поле, яке індуктує в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається.

Конструкція індуктора індукційної плити представлена на рис. 2.

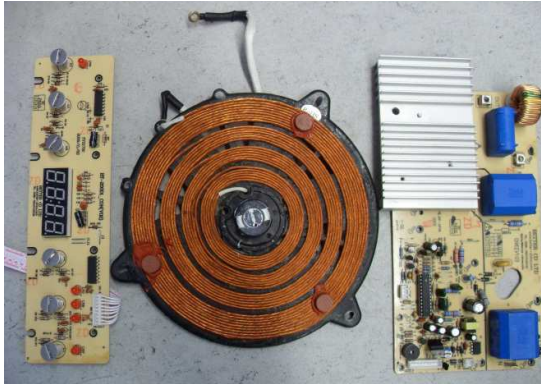


Рис. 2 – Плоский багатовитковий індуктор індукційної плити.

Мета роботи – розробка інженерної методики розрахунку індукторів індукційних кухонних плит.

Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит. Представлена в даній роботі методика розроблена на основі інженерних методів розрахунку плоских індукторів промислових індукційних нагрівачів [5] з урахуванням конструктивних особливостей та режимів роботи індукційних кухонних плит.

Вихідні дані для виконання розрахунків:

- геометрія (діаметр днища, товщина стінки) посуду, що нагрівається (сковорода, каструлі);
- електрофізичні властивості матеріалу посуду (питомий електричний опір, магнітні властивості) та їх залежність від температури;
- частота електромагнітного поля і напруга на індукторі;
- потужність, що виділяється в посуді, і температура нагріву;

Порядок розрахунку:

- вибір основних конструктивних рішень індуктора (зовнішній і внутрішній діаметри індуктора, зазор між індуктором і посудом, товщина індуктора);
- розрахунок електричних та енергетичних величин (питома поверхнева потужність в посуді, напруженість магнітного поля на поверхні індуктора і посуду, коефіцієнт зв'язку, активна і реактивна потуж-

ність в індукторі та в зазорі, повна потужність системи "індуктор – посуд", електричний ККД, коефіцієнт потужності, сила струму в індукторі, коефіцієнт заповнення та ін);

- визначення числа витків індуктора, розрахунок ширини витка та вибір індукуючого дроту;

Ескіз системи "індуктор-посуд, що нагрівається" наведений на рис. 3.

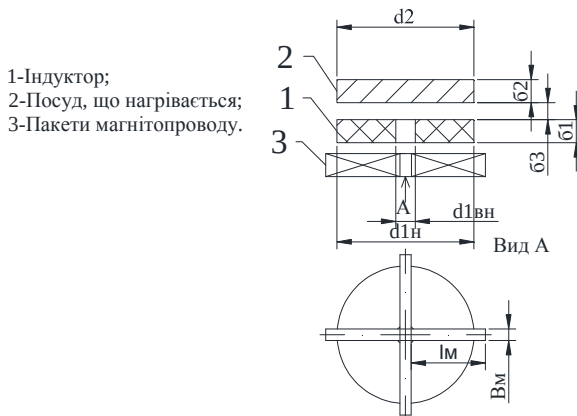


Рис. 3 – Ескіз системи "індуктор – посуд, що нагрівається".

Розглянемо основні етапи розрахунку.

1) Вибираються геометричні розміри індуктора (рис. 3). Зовнішній діаметр індуктора $d_{1н}$ приймається рівним діаметру поверхні, що нагрівається, тобто діаметру днища посуду d_2 :

$$d_{1н} \approx d_2. \quad (1)$$

Внутрішній діаметр індуктора $d_{1вн}$ вибирається за співвідношенням

$$d_{1вн} \approx (2-4)\delta_3. \quad (2)$$

При цьому, як і при проектуванні індукторів промислових пристроїв індукційного нагріву, зазор δ_3 приймається мінімальним, виходячи з наявності теплової та електричної ізоляції та з урахуванням технологічних вимог. Товщина індуктора δ_1 вибирається з умови мінімізації втрат

$$\delta_1 \geq 1,3\Delta_1, \quad (3)$$

де Δ_1 – глибина проникнення електромагнітного поля (товщина скін-слою) в матеріал індуктора, що розраховується за відомою формулою [5],

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2\rho_1}{\omega\mu}}, \quad (4)$$

де ρ_1 – питомий електричний опір матеріалу індуктора; μ – магнітна проникність матеріалу (для немагнітного матеріалу – індуктор, як правило, виконується з міді – $\mu = \mu_0$ – магнітна проникність вакуума); $\omega = 2\pi f$; f – частота електромагнітних коливань.

2) Розраховуються основні електричні та енергетичні параметри індуктора та системи "індуктор – посуд, що нагрівається". Питома поверхнева потужність в посуді p_{02} визначається за формулою:

$$p_{02} = \frac{4P_2}{\pi(d_{1н}^2 - d_{1вн}^2)}, \quad (5)$$

де P_2 – задана потужність, що виділяється в посуді.

Напруженість магнітного поля H_{02} на поверхні посуду, що нагрівається, розраховується за формулою [5]

$$H_{02} = \sqrt{\frac{p_{02} \cdot 10^6}{\rho_2 \mu f F_\Phi}}, \quad (6)$$

де ρ_2 – питомий електричний опір сталі посуду при заданій максимальній температурі її нагрівання t_2 ; μ_p – розрахункове значення відносної магнітної проникності при зазначеній температурі, що визначається за формулами та графіками, що наведені в [5]; F_Φ – поправочний коефіцієнт, значення якого визначається за графіками, наведеними в [5].

Потім визначається коефіцієнт зв'язку $k_{св}$, який фактично представляє собою коефіцієнт трансформації в припущенні, що індуктор і нагрівальний посуд є обмотками повітряного трансформатора [5]. Розрахунок коефіцієнта зв'язку виконується з використанням відповідного виразу, наведеного в [5].

Напруженість магнітного поля на поверхні індуктора H_{01} визначається за виразом

$$H_{01} = \frac{H_{02}}{k_{св}}. \quad (7)$$

Далі розраховується активна потужність в індукторі P_1 :

$$P_1 = \pi \cdot 10^{-6} \cdot H_{01}^2 \frac{d_{1н}^2 - d_{1вн}^2}{4} \sqrt{\rho_1 f F_{пл1}} \frac{1}{k_{зап}}, \quad (8)$$

де $k_{зап}$ – коефіцієнт заповнення індуктора, що враховує наявність міжвіткової ізоляції, який вибирається попередньо (зазвичай

$k_{\text{зап}} = 0,85-0,95$ [5]); $F_{\text{пл1}}$ – поправочний коефіцієнт, значення якого визначається за графіками, наведеними в [5].

Реактивні потужності в індукторі P_{Q1} , в посуді P_{Q2} та в зазорі P_{Q3} визначаються за формулами [5]:

$$P_{Q1} = P_1 \frac{G_1}{F_1}; \quad (9)$$

$$P_{Q2} = 0,6P_2 \frac{G_{\Phi}}{F_{\Phi}}, \quad (10)$$

де G_1 , G_{Φ} , F_1 , F_{Φ} – поправочні коефіцієнти, значення яких визначаються за графіками, наведеними в [5];

$$P_{Q3} = \pi \cdot 10^{-9} H_{01}^2 f \delta_3 d_{1H}^2. \quad (11)$$

Потім визначаються активна P_{Σ} та реактивна потужності $P_{Q\Sigma}$ системи "індуктор – посуд, що нагрівається" як суми відповідних потужностей, а також повна потужність системи $P_{S\Sigma}$:

$$P_{S\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + P_{Q\Sigma}^2}. \quad (12)$$

Далі виконується розрахунок електричного ККД η_{Σ} та коефіцієнта потужності $\cos \varphi$:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_2}{P_{\Sigma}}; \quad (13)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\Sigma}}{P_{S\Sigma}}. \quad (14)$$

Розрахунок сили струму в індукторі I_1 виконується за формулою:

$$I_1 = \frac{P_{S\Sigma} \cdot 10^3}{U_1}, \quad (15)$$

де U_1 – задана напруга на індукторі.

3) Виконується визначення числа витків індуктора, розрахунок ширини витка і вибір індукуючого дроту. Число витків індуктора w_1 розраховується за формулою [5]

$$w_1 = \frac{H_{01} \cdot 0,5(d_{1H} - d_{1BH})}{\sqrt{2}I_1}, \quad (16)$$

а ширина витка з ізоляцією b_1 визначається наступним чином:

$$b_1 = \frac{d_{1H} - d_{1BH}}{2w_1}. \quad (17)$$

Питання вибору індукуючого дроту буде розглянуто в наступній статті.

У промислових пристроях індукційного нагріву застосовуються магнітопроводи з електротехнічної сталі різних марок [5]. У кухонних індукційних плитах, на відміну від промислових пристроїв індукційного нагріву, магнітопроводи виконуються з феритів [2, 6], що дозволяє істотно зменшити масу конструкції і при цьому забезпечити високий електричний ККД плити. Методика розрахунку і проектування феритових магнітопроводів індукційних плит (розрахунок магнітного потоку, вибір матеріалу магнітопроводу, розрахунок геометрії і маси магнітопроводу, розрахунок активної та реактивної потужності в магнітопроводі) також буде розглянута в наступних роботах.

Вихідні дані для виконання розрахунків. У роботі виконано розрахунки індукторів індукційних кухонних плит для двох варіантів вихідних даних, наведених у табл. 1. Передбачається, що посуд, що нагрівається, являє собою сковороду, виготовлену зі Сталі 45 [5].

Таблиця 1 – Вихідні дані для виконання розрахунків

Номер варіанту	1	2
Діаметр днища посуду d_2 , м	0,12	0,24
Товщина стінки посуду δ_2 , м	0,003	0,004
Питомий електричний опір сталі посуду при 20 °С ρ , Ом·м	$18,9 \cdot 10^{-8}$	$18,9 \cdot 10^{-8}$
Температура нагріву посуду t_2 , °С	100	280
Питомий електричний опір сталі посуду при заданій температурі нагріву посуду ρ_2 , Ом·м	$23,8 \cdot 10^{-8}$	$38,16 \cdot 10^{-8}$
Частота електромагнітного поля f , кГц	100	20
Напруга на індукторі U_1 , В	220	220
Потужність, яка виділяється в посуді P_2 , кВт	2,0	3,3

Розрахунки виконані стосовно до сковорідок великого і малого діаметра (24 см і 12 см, відповідно) для мінімальної (20 кГц) і максимальної (100 кГц) частот електромагнітного поля, що використовується в сучасних індукційних кухонних плитах [1]. Відповідно до технічних характеристик індукційних плит [1], варіюється також потужність, що виділяється в посуді (2,0 кВт і 3,3 кВт), а також температура нагріву посуду (100 °С і 280 °С). Таким чином, в роботі виконано розрахунок двох індукторів (великого і малого діаметру для нагріву відповідного посуду) для застосування або у відповідних од-

ноконфорочних індукційних плитах, або в одній двоконфорочній плиті з конфорками різного діаметру.

Результати розрахунків та їх аналіз. Результати розрахунку індукторів для обох варіантів вихідних даних за формулами (1)-(17) представлені в табл. 2. Проаналізуємо коротко отримані результати.

Таблиця 2 – Результати розрахунків

Номер варіанту	1	2
Зовнішній діаметр індуктора $d_{1н}$, м	0,12	0,24
Внутрішній діаметр індуктора $d_{1вн}$, м	0,04	0,04
Зазор між індуктором та посудом δ_3 , м	0,01	0,01
Товщина індуктора δ_1 , м	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Питома поверхнева потужність в посуді p_{02} , кВт/м ²	199	75,1
Напруженість магнітного поля на поверхні посуду H_{02} , А/м	$1,55 \cdot 10^4$	$0,99 \cdot 10^4$
Коефіцієнт зв'язку $k_{св}$	0,235	0,253
Активна потужність в індукторі P_1 , кВт	2,058	1,49
Реактивна потужність в індукторі P_{Q1} , кВАр	2,058	1,49
Реактивна потужність в посуді P_{Q2} , кВАр	1,2	1,98
Реактивна потужність в зазорі P_{Q3} , кВАр	196,8	55,301
Активна потужність системи "індуктор-посуд" P_{Σ} , кВт	4,058	4,79
Реактивна потужність системи "індуктор-посуд" $P_{Q\Sigma}$, кВАр	200	58,771
Повна потужність системи "індуктор-посуд" $P_{S\Sigma}$, кВА	200,04	58,96
Електричний ККД η_3	0,493	0,688
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$	0,02	0,08
Струм індуктора I_1 , А	909,27	268
Число витків індуктора w_1	2	12
Ширина витка з ізоляцією b_1 , м	0,02	0,0095

Розраховані основні геометричні розміри системи "індуктор-посуд, що нагрівається" (рис. 3). Зовнішній діаметр індуктора прийнятий рівним діаметру поверхні, що нагрівається (діаметру сковороди). Величина зазору між індуктором і посудом, що нагрівається, попередньо прийнята рівною 10 см та буде уточнюватися в процесі проектування індукційної кухонної плити, виходячи з наявності теплової та електричної ізоляції з урахуванням особливостей технологічного процесу складання плити. Наведені в табл. 2 значення товщини індуктора, розраховані за формулою (3) для обох варіантів вихідних даних, являють собою мінімальні величини, які також будуть уточнюватися в ході

проектування індуктора. Серед розрахованих електричних та енергетичних величин найбільший інтерес представляє електричний ККД індукційної плити. Відносно невисокий ККД (табл. 2) може бути підвищений завдяки застосуванню феритового магнітопроводу. Питання розрахунку і проектування магнітопроводів індукційних кухонних плит будуть розглянуті в наступних роботах авторів. Також в наступних статтях планується детально розглянути вибір індукуючого дроту (розраховані значення числа витків індуктора і ширини витка з ізоляцією для обох варіантів вихідних даних наведено в табл. 2)

Розраховані конструкції двухвиткового та 12-виткового індуктора (вихідні дані та одержані результати – табл. 1, 2, варіанти 1 і 2, відповідно) представлені на рис. 4, 5. На рис. 6 показані основні конструктивні елементи індукційної кухонної плити з двухвитковим індуктором, розрахованим за розробленою авторами методикою. Розроблена конструкція одноконфорочної плити з двухвитковим індуктором представлена на рис. 7.

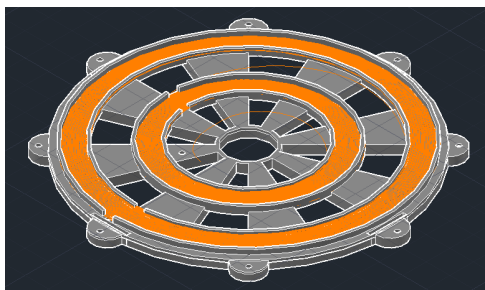


Рис. 4 – Розрахований двухвитковий індуктор індукційної кухонної плити (табл. 1, 2, варіант 1).

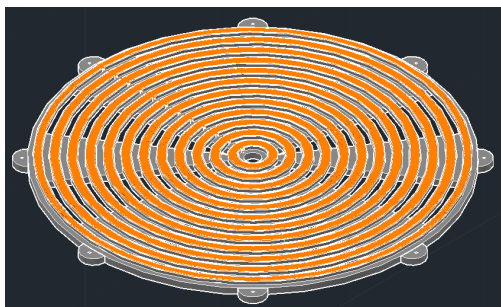


Рис. 5 – Розрахований 12-витковий індуктор індукційної кухонної плити (табл. 1, 2, варіант 2).

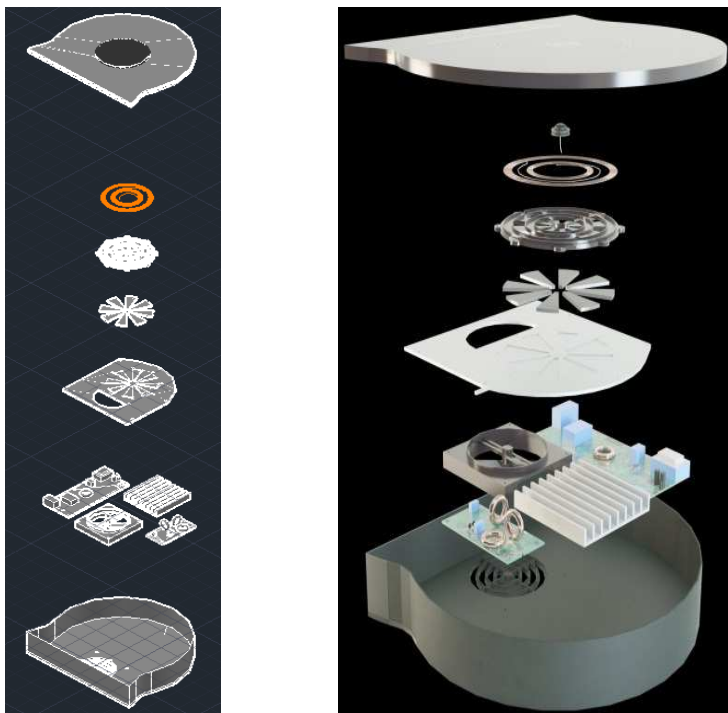


Рис. 6 – Основні конструктивні елементи індукційної кухонної плити з розрахованим двохвитковим індуктором: а – модель; б – 3d вид.

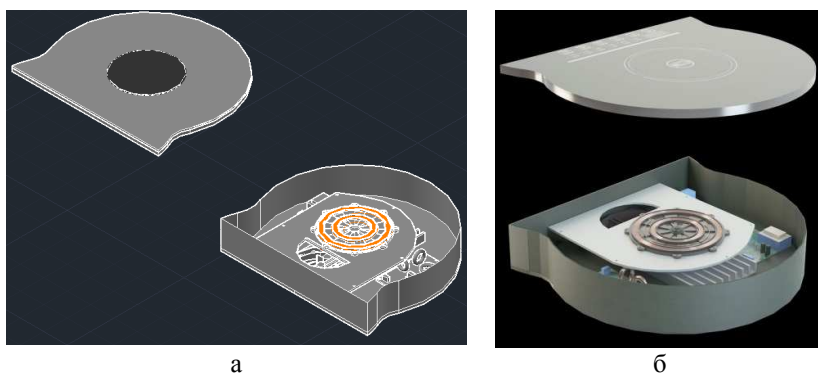


Рис. 7 – Проект одноконфорочної індукційної плити з двохвитковим індуктором: а – модель; б – 3d вид.

Висновки. У роботі запропонована інженерна методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит. Виконано розрахунок двох індукторів (великого і малого діаметра) для застосування у відповідних одноконфорочних індукційних плитах або в одній двоконфорочній плиті з конфорками різного діаметру. Розроблена методика розрахунку і отримані результати можуть бути використані в практиці конструювання індукційних плит, а також у навчальному процесі. Запропоновані конструкції індукторів можуть бути використані для комп'ютерного моделювання розподілів електромагнітних і теплових полів в індукційних плитах і посуді, що нагрівається.

Подальші дослідження з розрахунку індукційних кухонних плит доцільно проводити у наступних напрямках:

- вибір дроту для виготовлення індуктору
- розробка та використання методики розрахунку феритового магнітопроводу з урахуванням магнітних властивостей відповідного матеріалу
- комп'ютерне моделювання зв'язаних (мультифізичних) електромагнітних та теплових процесів, які мають місце у посуді, що нагрівається, а також у інших конструктивних елементах (індукторі, магнітопроводі) індукційної кухонної плити в процесі її функціонування, з метою уточнення результатів, отриманих з використанням запропонованої авторами інженерної методики. Для чисельного аналізу розподілу зв'язаних електромагнітного та теплового полів у індукційних плитах доцільно використати методику комп'ютерного моделювання відповідних процесів у промислових індукційних нагрівачах, розроблену раніше [7].

Список літератури: 1. TechNOVO. Web. 15 апреля 2014 <<http://technovo.com.ua/shop/category/plity-indukcionnye-nastolnye/?gclid=CluHsNC3tbwCFdShtAodAG4Acw>>. 2. Ebay. Web. 15 апреля 2014. <<http://www.ebay.de/bhp/induktionskochfeld>>. 3. Clatronic. Web. 15 апреля 2014. <http://clatronic.com.ua/component/page,shop.browse?option=com_virtuemart/task/view/category_id,53/itemid,61/>. 4. HotLine. Web. 15 апреля 2014. <<http://hotline.ua/bt/kuhonnye-plity-i-poverhnosti/759-3266-794/?o=1&gclid=CMjZ5My3tbwCFMPtAod4U8ALw>>. 5. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с. 6. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты: Энциклопедический справочник. – т. 1: Магниты и магнитные системы. – СПб: ЛИК, 2004. – 358 с. 7. Pantelyat M.G., Féliachi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals // The European Physical Journal Applied Physics. – 2002. – v. 17. – P. 29-33.

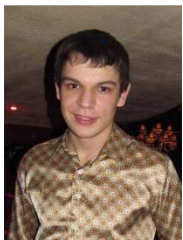
Bibliography (transliterated): 1. TechNOVO. Web. 15 April 2014 <<http://technovo.com.ua/shop/category/plity-indukcionnye-nastolnye/?gclid=>

CluHsNC3tbwCFdShtAodAG4Acw>. 2. Ebay. Web. 15 April 2014. <http://www.ebay.de/bhp/induktionskochfeld>. 3. Clatronic. Web. 15 апреля 2014. <http://clatronic.com.ua/component/page,shop.browse?option=com_virtuemart/task,view/category_id,53/Itemid,61/> 4. HotLine. Web. 15 апреля 2014. <<http://hotline.ua/bt/kuhonnnye-plity-i-poverhnosti/759-3266-794/?o=1&gclid=CMjZ5My3tbwCFtMPtAod4U8ALw>>. 5. Kuvaldin A.B. *Induction Heating of Ferromagnetic Steel*. Moscow: Energoatomizdat, 1988. Print. 6. Kunevich A.V., Podol'skij A.V., Sidorov I.N. *Ferrity: Jenciklopedicheskij spravocnik. Magnity i magnitnye sistemy*. – St. Petersburg: LIK, 2004. Print. 7. *Pantelyat M.G., Féliachi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals. The European Physical Journal Applied Physics*. – 2002. – vol. 17. – P. 29-33. Print.

Надійшла (received) 17.04.14



Пантел'ят Михайло Гаррієвич, старший викладач кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "ХПІ". В 1985 р. закінчив Харківський політехнічний інститут за спеціальністю "Інженерна електрофізика". Кандидат фізико-математичних наук (1991 р., спеціальність "Механіка деформівного твердого тіла). Основні наукові інтереси: комп'ютерне моделювання електромагнітних, теплових і механічних процесів в електромагнітних пристроях різного призначення.



Гуренцов Юрій Володимирович, студент електромашинобудівного факультету Національного технічного університету "ХПІ", група ЕМБ-20Б. Область інтересів – дослідження, розрахунок і проектування сучасної електропобутової техніки.



Трофімов Андрій Володимирович, студент електромашинобудівного факультету Національного технічного університету "ХПІ", група ЕМБ-20Б. Область інтересів – дослідження, розрахунок і проектування сучасної електропобутової техніки.

В.Ф. БОЛЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ"

С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ"

СРАВНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведено сравнение электромеханических показателей индукционно-динамического двигателя и электромагнитного двигателя, предназначенных для работы в качестве актуатора электрических коммутационных аппаратов. Для сравнения выбраны двигатели с одинаковыми массогабаритными параметрами при использовании емкостного накопителя энергии и электронной системы, формирующей апериодический импульс тока. Показаны преимущества индукционно-динамического двигателя по скоростным показателям по отношению к электромагнитному двигателю.

Ключевые слова: индукционно-динамический двигатель, электромагнитный двигатель, актуатор, скоростные показатели.

Введение. Индукционно-динамические (ИДД) и электромагнитные двигатели (ЭМД) широко используются в промышленных, и научно-технических системах, где необходимы высокоскоростные линейные перемещения исполнительного элемента на относительно небольшом активном участке [1-3]. Одной из наиболее эффективных областей применения указанных двигателей является привод быстродействующих электрических коммутационных аппаратов (ЭКА) [4, 5]. В настоящее время в качестве исполнительного устройства (актуатора) ЭКА применяются механические накопители энергии (сжатые пружины), гидравлические приводы, ротационные электродвигатели с преобразованием вращения в линейное перемещение и др.

Применение ИДД и ЭМД для привода ЭКА наиболее целесообразно из-за небольших массогабаритных параметров и непосредственного преобразования электрической энергии в линейное перемещение контактной системы аппарата. Однако ИДД с электропроводящим якорем, работающим на отталкивание от индуктора, и ЭМД с ферромагнитным якорем, работающим на притяжение к индуктору, имеют различные электромеханические показатели, что обуславливает задачу их сравнительного анализа.

Анализ литературы. Во многих устройствах науки и техники применяются ИДД и ЭМД. В строительстве применяются различные электромагнитные молоты и перфораторы для разрушения монолитно-

© В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, 2014

бетонных оснований, устройства для погружения свай и анкеров [2, 6]. В горнодобывающей промышленности используются бутобой различной мощности, разделители пород, вибраторы; в геологоразведке – сейсмоисточники различной мощности и возмущающей силы; в машиностроении – молоты с большим диапазоном энергии удара и т.п. [7]. Для авиационной, ракетно-космической и оборонной техники разрабатываются пусковые устройства и ускорители массивных объектов [8-10]. Для исследования микрометеоритных ударов на космические или ответственные наземные объекты используются научно-технологические пусковые установки [11, 12]. Ударные устройства применяются в быстродействующей клапанной и коммутационной аппаратуре, в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки и др. [13, 14]. Для прессования порошков, очистки вагонов, трюмов и иных емкостей от остатков продуктов и налипания материалов и др. применяются различные технологические ударные устройства [15, 16]. Однако при этом отсутствует сравнительный анализ скоростных показателей ИДД и ЭМД, работающих от одинакового источника энергии, что не позволяет делать обоснованные выводы о сферах их применениях [17-19].

Целью работы является сравнение электромеханических показателей ИДД и ЭМД, предназначенных для работы в качестве актуатора ЭКА.

Математическая модель. Для расчетов рабочих процессов проведено компьютерное моделирование ИДД и ЭМД в программном пакете COMSOL Multiphysics 4.4, основанное на дифференциальных уравнениях в частных производных, в основу которого заложен метод конечных элементов.

С использованием условия Дирихле на границах расчетной области в цилиндрической системе координат рассчитывается векторный магнитный потенциал A

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r\mu(B)} \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - \gamma \frac{\partial A}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

где $\mu(B)$ – магнитная проницаемость материала ферромагнитного сердечника и якоря ЭМД; γ – электропроводность материала активных элементов электродвигателей.

Составляющие вектора магнитной индукции находятся по известным соотношениям:

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{d(rA)}{dr}; \quad B_r = -\frac{dA}{dz}. \quad (2)$$

Локальная плотность тока на каждом участке электропроводящего якоря ИДД определяется по известному выражению

$$j = -\gamma \frac{\partial A}{\partial t}. \quad (3)$$

Электродинамическая сила (ЭДУ), действующая на якорь, рассчитывается по формуле:

$$f_z = 0,5 \oint (H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - n(H \cdot B)) dS \quad (4)$$

где S – поверхность, ограничивающая подвижный якорь в пространстве $\{r, z\}$.

Для ферромагнитного материала ферромагнитного сердечника (ФС) и якоря ЭМД используется нелинейная кривая намагничивания $B = f(H)$

Импульс ЭДУ, действующий на подвижный якорь, определяется выражением:

$$F_z = \int_0^t f_z dt \quad (5)$$

При расчете взаимосвязанных переходных электромагнитных, электродинамических, механических и тепловых процессов предполагается отсутствие деформации элементов электродвигателей. При этом учитывается пространственное распределение индуцированного тока по сечению электропроводящего якоря ИДД, магнитного и теплового поля, сопротивление окружающей среды при движении якоря на каждом временном шаге [20].

Геометрические параметры ИДД и ЭМД. Основные параметры ЭМД и ИДД с дисковым якорем и ФС, охватывающим индуктор с нижней и наружной поверхности, представлены в табл. 1. На рис. 1 и рис. 2 показаны, соответственно, общий вид и сечение ЭМД и ИДД с распределением поля в момент максимума ЭДУ. На этих рисунках обозначены: 1 – неподвижный индуктор, 2а – электропроводящий якорь ИДД, выполненный из технической меди; 2б – ферромагнитный якорь ЭМД, выполненный из стали марки Ст.10 (AISI 1010, UNS G10100).

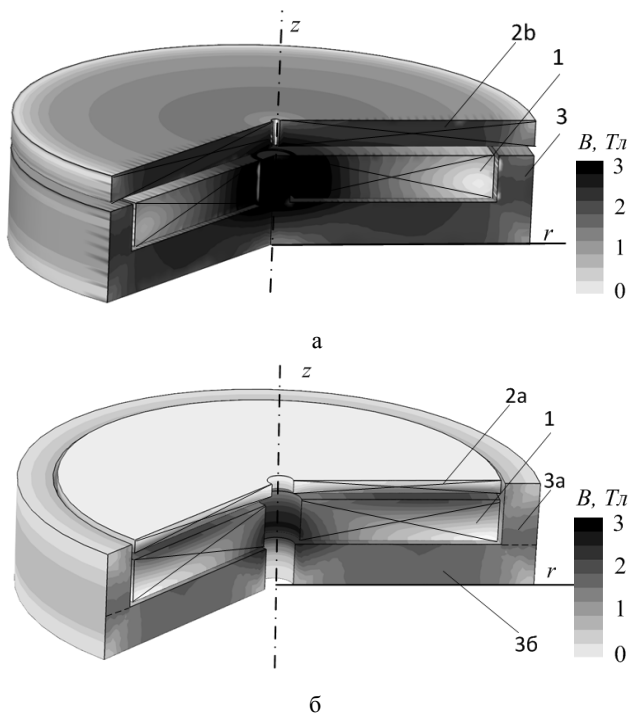


Рис. 1 – Общий вид ЭМД и ИДД с указанием распределения магнитных полей: а – ЭМД; б – ИДД.

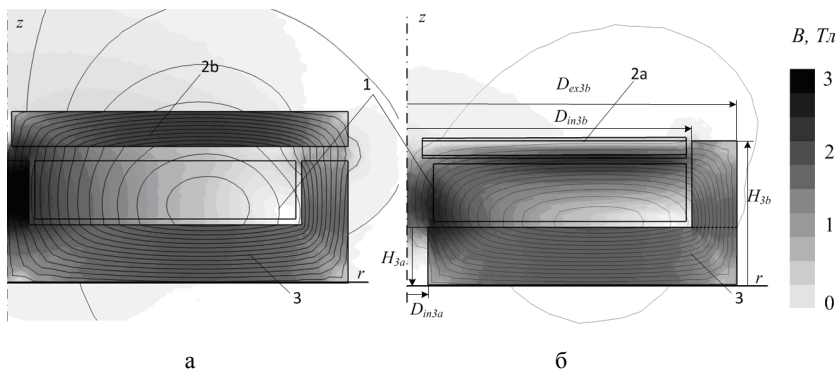


Рис. 2 – Сечение ЭМД и ИДД с указанием распределения магнитных полей: а – ЭМД; б – ИДД.

В исследуемых двигателях применен коаксиальный ФС 3, который можно представить состоящим из дискового основания 3б, охватывающего индуктор 1 снизу, и наружной обечайки 3а, охватывающей индуктор с наружной боковой поверхности. Расстояние между смежно расположенными сторонами индуктора и ФС заполнено изоляцией толщиной $\delta = 1$ мм. Ферромагнитный якорь ЭМД и ФС выполнены шихтованными из стали Ст.10.

Таблица 1 – Основные параметры исследуемого ИДД и ЭМД

Показатель	Обозначение	ИДД	ЭМД
		Значение	
Внешний диаметр индуктора	D_{ex1} , мм	100,0	
Внутренний диаметр индуктора	D_{in1} , мм	10,0	
Высота индуктора	H_1 , мм	10,0	
Внешний диаметр якоря	D_{ex2} , мм	100,0	118,0
Внутренний диаметр якоря	D_{in2} , мм	10,0	
Высота якоря	H_2 , мм	3,0	
Начальное расстояние между индуктором и якорем	δ , мм	1,0	2,0; 2,5; 3,0
Количество витков индуктора	N_1 , шт.	46	
Сечение шины индуктора	$a \times b$, мм ²	8,64	
Масса якоря + масса исполнительного элемента	m , кг	0,205+0,5	0,53+0,5
Высота дисковой части ФС	H_{3a} , мм	10,0	
Высота цилиндрической части ФС	H_{3b} , мм	24,0	21,0
Внешний диаметр ФС	D_{ex3b} , мм	118,0	
Внутренний диаметр ФС	D_{in3b} , мм	102,0	
Емкость ЕНЭ	C , мкФ	2850	
Зарядное напряжение ЕНЭ	U_0 , В	400	

Сравнение электромеханических показателей ИДД и ЭМД. ЭКА требует быстрой коммутации электрической цепи, что обуславливает высокую скорость перемещения якоря относительно индуктора в актуаторе.

Рассмотрим электромеханические процессы в ИДД и в ЭМД с одинаковыми параметрами источника энергии, противодействующих усилий и массогабаритных показателей.

Исследованы электромеханические характеристики для четырех вариантов: 1 – ЭМД с рабочим зазором 2 мм, 2 – ЭМД с рабочим зазором 2,5 мм, 3 – ЭМД с рабочим зазором 3 мм, 4 – ИДД. Рабочий зазор ЭМД ограничивает величину рабочего хода ферромагнитного якоря, в

то время, как величина рабочего хода электропроводящего якоря в ИДД практически не ограничена.

Возникающий в ИДД токовый импульс по амплитуде практически аналогичен амплитуде импульса для ЭМД. На рис. 3 показана плотность тока в индукторе рассматриваемых двигателей. Величина рабочего зазора в ЭМД мало влияет на ток в индукторе. Ток в индукторе ИДД имеет более короткую длительность, чем в ЭМД: максимальное значение тока в индукторе ЭМД возникает в момент времени, который более чем в два раза превышает аналогичное время ИДД.

При протекании импульса тока в индукторе ИДД возникает аксиальная сила отталкивания, действующая на электропроводящий якорь, в то время как в ЭМД на ферромагнитный якорь действует аксиальная сила притяжения (рис. 3, б). В ИДД возникает относительно кратковременное силовое воздействие на электропроводящий якорь, превышающее по амплитуде на 65 % аналогичную величину силового импульса в ЭМД. В ИДД длительность силового воздействия существенно меньше, чем в ЭМД.

В ИДД форма силового импульса гладкая и имеет выраженную составляющую отталкивания, которая через определенное время после начала возбуждения (через 1,25 мс) принимает характер притяжения, но с многократно меньшей величиной.

Сила притяжения в ЭМД изменяется нелинейно и увеличивается с уменьшением рабочего зазора между ферромагнитным якорем и ФС. При достижении нулевого значения зазора движение прекращается, создавая только удерживающее усилие ($t > 1,6$ мс). При этом характер силы притяжения резко меняется от начального возрастания до последующего плавного затухания после соударения с ФС (в расчетах считаем отсутствие механических колебаний якоря при соударении). Чем меньше рабочий зазор между индуктором и ферромагнитным якорем ЭМД, тем быстрее и большего значения достигает максимальная сила притяжения f_z . Однако это изменение незначительно (не превышает 3...6 %).

На рис. 4 показано изменение импульса силы F_z для рассматриваемых электродвигателей. В ИДД импульс силы отталкивания через определенное время (около 1,0 мс) выходит практически на насыщение. В ЭМД импульс силы притяжения в интервале до 5 мс растет и примерно через 2,0 мс превышает импульс силы отталкивания в ИДД.

На рис. 5 показано изменение скорости якоря рассматриваемых электродвигателей. Отметим, что скорость ферромагнитного якоря ЭМД возрастает только до момента соприкосновения с ФС. Если ра-

бочий зазор наименьший (2 мм), то начальная скорость ферромагнитного якоря нарастает более быстро. Но наибольшая скорость развивается в момент соударения этого якоря с ФС при наибольшем рабочем зазоре (3 мм).

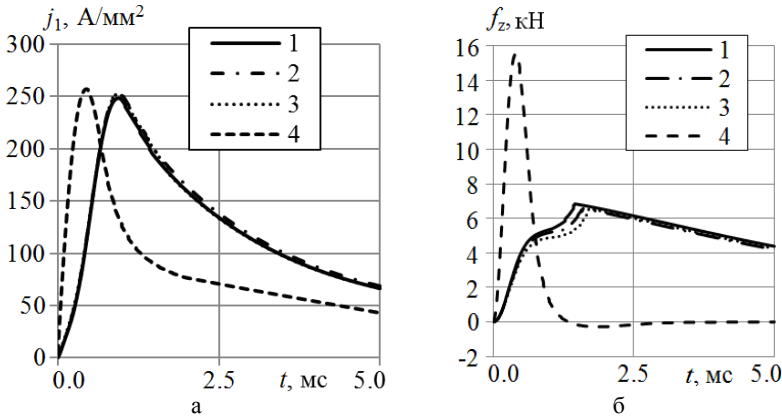


Рис. 3 – Изменение плотности тока в индукторе j_1 и аксиальной силы, действующей на якорь f_z в ИДД и ЭМД в течении рабочего цикла:
а – плотности тока в индукторе; б – аксиальная сила.

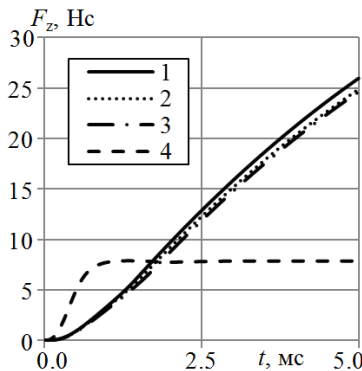


Рис. 4 – Изменение импульса силы F_z ИДД и ЭМД в течении рабочего цикла

В ИДД скорость нарастает существенно быстрее, чем в ЭМД, достигая более высоких значений (более чем в 2 раза). Однако эта скорость через определенное время (около 1 мс) практически не изменяется.

Таким образом, можно отметить, что при использовании одинакового источника энергии в ИДД обеспечиваются повышенные скоро-

стные показатели по сравнению с ЭМД. При этом величина рабочего хода электропроводящего якоря существенно больше, чем в ЭМД, в котором к тому же имеет место соударение ферромагнитного якоря с неподвижным ФС.

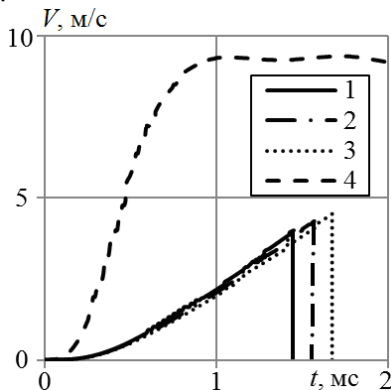


Рис. 5 – Изменение скорости якоря ИДД и ЭМД в течении рабочего цикла.

Выводы. Возникающий в ИДД токовый импульс по величине практически аналогичен амплитуде импульса для ЭМД. Ток в индукторе ИДД быстрее имеет более короткую длительность, чем аналогичный ток в ЭМД.

В ИДД возникает кратковременное силовое воздействие на электропроводящий якорь, превышающее по амплитуде на 65% аналогичную величину силового импульса в ЭМД. Однако в ИДД длительность силового воздействия существенно меньше, чем в ЭМД.

В ИДД скорость нарастает существенно быстрее, чем в ЭМД, достигая более высоких значений, но она через определенное время практически не изменяется.

Список литературы: 1. *Афонин А.А., Гребеников В.В.* Электродинамические системы повышенного быстродействия // *Техническая электродинамика*. – 1994. – № 5. – С. 23-29. 2. *Угаров Г.Г., Нейман В.Ю.* Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 2002. – № 2. – С. 37-43. 3. *Балковой А.П., Костин А.В., Мяжких А.С. и др.* Особенности проектирования гаммы прямых линейных электроприводов для машиностроения // *Электротехника*. – 2013. – № 7. – С.13-20. 4. *Cho D.J., Woo D.K., Ro J.S. et al.* Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter-locking mechanism for a magnetic switch // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2013. – Vol. 49, №5 – P. 2229-2232. 5. *Bissal A., Magnusson J., Engdahl G.* Comparison of two ultra-fast actuator concept // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48, №11. – P. 3315-3318. 6. *Кузнецов П.В., Толмачев Н.С., Харитонов В.Д. и др.* Индукционно-динамическая система очистки сушильного

оборудования // Молочная промышленность. – 1989. – № 1. – С. 25-26. **7.** Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотраков Д.В. Разработка эффективных технологических устройств для магнитно-эластоимпульсной вырубки-пробивки тонколистовых материалов // Металлообработка. – 2001. – № 2. – С. 28-32. **8.** Fair H.D. Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era // IEEE Trans. Magnetics. – 2005. – № 1, Vol. 41. – P. 158-164. **9.** Reck B. First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range // IEEE Trans. Magnetics. – 2003. – № 1, Vol. 39. – P. 310-313. **10.** Liao M., Zabar Z., Czarkowski D. et al. On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher // IEEE Trans. Magnetics. – 1999. – № 1, Vol. 35. – P. 148-153. **11.** Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – 2010. – № 1. – С. 22-28. **12.** Upshaw J.L., Kajs J.P. Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator // IEEE Trans. Magnetics. – 1991. – № 1, Vol. 27. – P. 607-610. **13.** Таммышевский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 12. – С. 52-57. **14.** Пемленко Б.И. Оптимизация линейных электроприводов стендов для динамических испытаний автомобилей // Электрическое и электронное оборудование автомобилей, тракторов и их роботизированных производств. – М.: МАМИ, 1992. – С. 60-68. **15.** Тютькин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 24-28. **16.** Таммышевский К.В., Марычев С.Н., Козлов С.А. Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности // Современные технологии безопасности. – 2005. – № 4. – С. 8-11. **17.** Гурин А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 2. – С. 3-6. **18.** Стрижаков Е.Л., Нескоромный С.В., Меркулов Р.В. Ударная конденсаторная сварка с магнитно-импульсным приводом // Сварочное производство. – 2009. – № 2. – С. 33-35. **19.** Мазуренко М.И., Петухов В.А., Поводайло В.А. и др. Электродинамический импульсный клапан для получения молекулярных пучков // Приборы и техника эксперимента. – 2002. – № 2. – С. 152-155. **20.** Болюх В.Ф., Олексенко С.В., Щукун И.С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №6. – С.20-27.

Bibliography (transliterated): **1.** Afonin A.A., Grebenikov V.V. "Electrodynamic systems improved performance". *Technical electrodynamics*. No. 5. 1994. 23-29. Print **2.** Ugarov G.G., Neumann V.Y. "Trends in the development and application of hand shock machines with electromechanical energy conversion". *Proceedings of Higher Education. Electromechanics*. No. 2. 2002. 37-43. Print. **3.** Balkovoj A.P., Kostin A.V., Mjagkih A.S. etc. "Design features range direct linear actuators for engineering". *Electrical Engineering*. No. 7. 2013. 13-20. Print. **4.** Cho D.J., Woo D.K., Ro J.S. et al. "Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter-locking mechanism for a magnetic switch". *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 49. No. 5. 2013. 2229-2232. Print. **5.** Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. "Comparison of two ultra-fast actuator concept" *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 48, No. 11. 2012. 3315-3318. Print. **6.** Kuznetsov P.V., Tolmachev N.S., Kharitonov V.D. etc. "Induction-dynamic cleaning drying equipment". *Dairy industry*. No. 1. 1989. 25-26. Print. **7.** Zdor G.N., Mamut A.V., Mamut V.S., Smotrakov D.V. "Development of effective technological devices for magnetic elastoimpulsnoy cutting-punching sheet materials". *Metal processing*. No. 2. 2001. 28-32. Print. **8.** Fair H.D. "Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 41. No. 1. 2005. 158-164. Print. **9.** Reck

B. "First design study of an electrical catapult for unmanned air vehicles in the several hundred kilogram range". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 39. No. 1. 2003. 310-313. Print. **10**. Liao M., Zabar Z., Czarkowski D. et al. "On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher". *IEEE Trans. Magnetics*. Vol. 35. No. 1. 1999. 148-153. Print. **11**. Chemerys V.T., Bolyukh V.F., Mashtalir V.V. "The project analysis of induction thruster parameters for the field mortaring". *Modern information technologies in the field of security and defense*. No. 1. 2010. 22-28. Print. **12**. Upshaw J.L., Kajs J.P. "Micrometeoroid impact simulations using a railgun electromagnetic accelerator". *IEEE Trans. Magnetics*. No. 1, Vol. 27. 1991. 607-610. Print. **13**. Tatmyshevsky K.V., Kozlov S.A. "Magnetic pulse position for testing products for aerospace shock effects". *Aerospace Instrument*. No. 12. 2005. 52-57. Print. **14**. Petlenko B.I. "Optimization of linear electric stands for dynamic testing of vehicles". *Electrical and electronic equipment in automobiles, tractors and robotic industries*. Moscow: MAMI, 1992. 60-68. Print. **15**. Tyutkin V.A. "Magnetic pulse method for breaking arches and cleaning of process equipment from adhering materials". *Electrical Engineering*. No. 11. 2002. 24-28. Print. **16**. Tatmyshevsky K.V., Marychev S.N., Kozlov S.A. "Magnetic pulse propelling means defeat for active protection systems objects of particular importance". *Modern security technology*. No. 4. 2005. 8-11. Print. **17**. Gurin A.G., Naboka B.G., Gladchenko V.Y. "Wave phenomena in electro-dynamic emitters and the formation of complex sonar signals". *Tekhnichna elektrodinamika*. No. 2. 2001. 3-6. Print. **18**. Strizhakov E.L., Neskoromnyi S.V., Merkulov R.V. "Shock capacitor welding with pulsed magnetic drive". *Welding Engineering*. No. 2. 2009. 33-35. Print. **19**. Mazurenko M.I., Petukhov V.A., Povedailo V.A. etc. "The electrodynamic pulse valve for molecular beam". *Instruments and Experimental Techniques*. No. 2. 2002. 152-155. Print. **20**. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. "Influence of parameters of the ferromagnetic core on the efficiency of induction-dynamic engine". *Elektrotehnika & Elektromekhanika*. No. 6. 2012. 20-27. Print.

Поступила (received) 29.04.2014



Болох Владимир Федорович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.



Олексенко Сергей Владимирович. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2011 г. Аспирант кафедры общей электротехники НТУ "ХПИ". Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия.

Л.П. ГАЛАЙКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОМ ДВИГАТЕЛЕ В РЕЖИМЕ ПУСКА

В статье рассматривается вопрос анализа влияния закона изменения управляющих параметров на характер переходных процессов в режиме пуска в вентильно-индукторном двигателе рудничного электровоза с помощью разработанных моделей для программы Simulink пакета программ Matlab. Приведены результаты расчетов на этих моделях для двигателя мощностью 27 кВт и частотой вращения 1215 об/мин.

Ключевые слова: вентильно-индукционный двигатель, переходные режимы работы, анализ, SIMULINK, режим пуска.

Введение. Режим пуска вентильно-индукторного двигателя (ВИД) рудничного электровоза качественно анализируется в работе [1]. Здесь основное внимание уделено проблеме снижения пульсаций момента в этом режиме. Авторы приводят достигнутый результат в решении этой проблемы – 9 %, однако, они не объясняют, каким образом он достигнут. Кроме того, отсутствуют графики переходных процессов, иллюстрирующие этот результат. В работе [2] автор данной статьи приводит результаты расчета переходного процесса пуска ВИД мощностью 27 кВт и частотой вращения 1215 об/мин. В процессе пуска для выхода на установившийся режим углы включения θ_{on} и отключения θ_{off} изменялись ступенями (3 ступени). Расчет проведен по программе на языке Паскаль. Однако и в этой работе отсутствует анализ пульсаций момента, так как на графиках приведены значения среднего момента.

Достижения в области микропроцессорной техники обеспечивают в современных регулируемых электроприводах получение требуемых динамических характеристик за счет применения все более сложных алгоритмов управления, реализуемых программно в микроконтроллерах. Хорошим тренажером для отладки этих программ является имитационное моделирование в программе Simulink пакета программ Matlab. В работе [3] приведено описание разработанной автором этой статьи модели для программы Simulink для анализа переходных процессов в ВИД. С целью оценки адекватности этой модели проведен расчет нерегулируемого процесса пуска, и результаты расчета на модели сравнивались с результатами расчета по программе на языке Паскаль.

Цель работы. Разработать дополнительные субмодели к модели, описанной в работе [3], для анализа влияния закона изменения управляющих параметров на характер переходных процессов в режиме пуска. Провести расчеты переходных процессов пуска вентильно-индукторного двигателя при разных законах изменения управляющих параметров с целью определения законов, обеспечивающих минимальные пульсации мгновенного значения момента.

Описание расчетного эксперимента. Исследования проведены на примере четырехфазного ВИД мощностью 27 кВт, частотой вращения 1215 об/мин, спроектированного для привода рудничного электровоза на базе двигателя постоянного тока, который выпускается серийно.

Основными управляющими параметрами (УП) в ВИД являются:

- 1) угол включения θ_{on} , угол между полюсами ротора и статора, при котором происходит подача напряжения на катушки фазы;
- 2) угол отключения θ_{off} , угол между полюсами ротора и статора, при котором отключают напряжение;
- 3) релейное регулирование величины тока (задание I_{max} и I_{min});
- 4) величина питающего напряжения.

В данной работе проведен анализ влияния 1, 2 и 3 УП.

На рис. 1, 2, 3 приведены графики, иллюстрирующие результаты одного из экспериментов. Исходные данные эксперимента: напряжение 200 В, момент сопротивления 200 Н·м, $\theta_{on} = 22^\circ$, $\theta_{off} = 7,4^\circ$, $I_{max} = 220$ А, $I_{min} = 200$ А. Во время переходного процесса углы θ_{on} и θ_{off} непрерывно изменялись по закону, заданному в блоке *Look-up Table*. В конце переходного процесса получено: $\theta_{on} = 30,2^\circ$, $\theta_{off} = 11,45^\circ$, угловая скорость – 119 рад/с, пульсации момента – 15 %. В переходном процессе пульсации момента постепенно уменьшались от 70 % вначале до 15 % в конце. Непрерывное изменение углов включения предполагает использование либо бездатчиковой системы управления, либо комбинированной системы – использование датчиков положения ротора и программного определения углов.

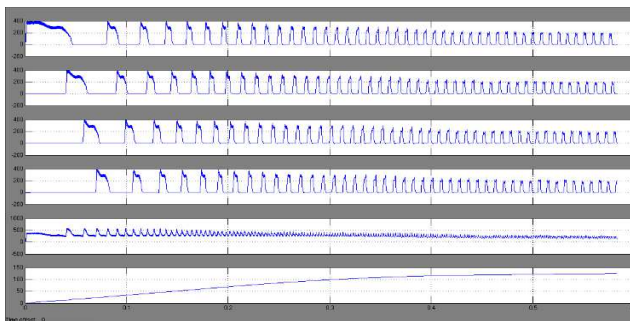


Рис. 1 – Графики изменения моментов фаз, результирующего момента и угловой скорости в переходном процессе

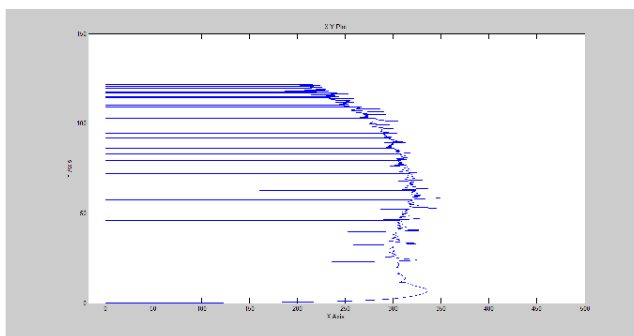


Рис. 2 – Зависимость угловой скорости от среднего значения момента в процессе пуска.

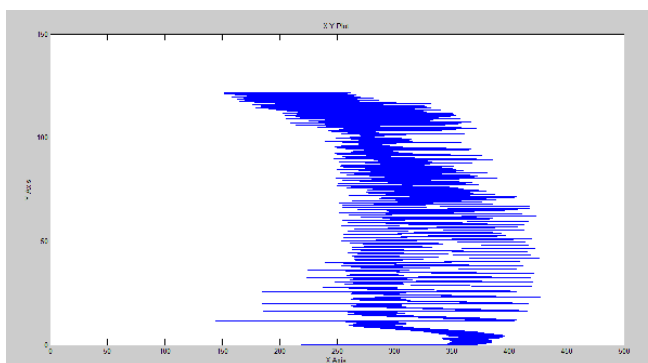


Рис. 3. – Зависимость угловой скорости от мгновенного значения момента в процессе пуска.

Выводы. Как показали расчеты, является возможным уменьшение пульсаций момента путем подбора закона изменения значений управляющих параметров. Требуется дальнейшее совершенствование законов регулирования с целью уменьшения пульсаций момента.

Список литературы: 1. Л.Ф. Коломойцев и др. Режимы работы тягового электропривода рудничного электровоза с трехфазным реактивным индукторным двигателем. / Известия вузов. Электромеханика. №2. 2002г. 2. Л.П. Галайко. Пуск вентильно-индукторного двигателя. // Вестник НТУ "ХПИ" 11'2003, с. 24-27. 3. Галайко Л.П. Имитационное моделирование вентильно-индукторного двигателя в переходных режимах. // Вестник НТУ "ХПИ" 48'2005, Харьков, 2005, с. 24-27. 4. Л.П. Галайко. Формирование механической характеристики вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза. Вестник НТУ "ХПИ" 44'2009. – С. 48-51. 5. Л.П. Галайко, И.А. Голосный. Исследование режима постоянной мощности вентильно-индукторного двигателя рудничного электровоза. Вестник НТУ "ХПИ" 35'2005, С. 43-46. 6. Galayko L.P. Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctance motor. ABSTRACTS. ICEEE-2010. 13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components. September 19-25, 2010. Alushta, Crimea, Ukraine, P. 96.

Bibliography (transliterated): 1. L.F. Kolomoitsev, etc. "Operation modes of a railway drive of a mine electric locomotive with a three-phase reluctance induction motor". *Electromechanics*. No. 2. 2002. Print. 2. L.P. Galayko. "Start of a Swithed Reluctance Motor". *Visnyk NTU "HPI"*. No 11 (2003). Kharkiv: NTU "HPI". 2003. 24-27. Print. 3. Galayko L.P. "Imitation modeling of a Swithed Reluctance Motor in transients". *Visnyk NTU "HPI"*. No. 48 (2005). Kharkiv: NTU "HPI". 2005. 24-27. Print. 4. Galajko L.P. "Formirovanie mehanicheskoy harakteristiki ventil'no-induktornogo dvigatelja rudnichnogo jelektrovoza". *Vestnik NTU "HPI"* No. 44 (2009). Kharkiv: NTU "HPI". 2009. 48-51. Print. 5. Galajko L.P., Golosnyj I.A. "Issledovanie rezhima postojannoij moshhnosti ventil'no-induktornogo dvigatelja rudnichnogo jelektrovoza". *Vestnik NTU "HPI"*. No. 35 (2005). Kharkiv: NTU "HPI". 2005. 43-46. Print. 6. Galayko L.P. "Analysis different dynamic modes in simulation model of switched reluctance motor." *ICEEE-2010. 13th International Conference on Electromechanics, Electrotechnology, Electromaterials and Components*. September 19-25, 2010. Alushta, Crimea, Ukraine, P. 96. Print.



Галайко Лидия Петровна, доцент, кандидат технических наук. Защитила диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты соответственно в 1960 и 1969 гг. Доцент кафедры "Электрические машины" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 1975 г. Научные интересы связаны с проблемами специальными электрических машин, в частности, вентильно-индукторных.

Поступила (received) 01.04.2014

И.А. КОСТЮКОВ, аспирант, НТУ "ХПИ"

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ОЦЕНКЕ КОМПОНЕНТ
НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СТАЛЬНОЙ
ПРОВОЛОКЕ БРОНИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ**

С применением полинома Чебышева получены выражения для достаточно точной аппроксимации распределения радиальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля на поверхности стальной проволоки брони силового кабеля. Повышение точности достигается путем соответствующего выбора узлов интерполяции.

Ключевые слова: полином Чебышева, радиальная и тангенциальная составляющие напряженности магнитного поля, броня силового кабеля.

Введение. В [1, 2], используя известные аналитические решения уравнения Гельмгольца, были найдены выражения для непосредственной оценки радиальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля и магнитной индукции в проволоке брони силового кабеля в приближении плоскопараллельного поля, то есть без учета реальной спиральной геометрии проволоки. Граничное условие для указанных компонент было получено вычислением искомой составляющей напряженности поля в нескольких точках, с последующей аппроксимацией с использованием полинома Лагранжа, отсчет полярного угла производился от оси соединяющей центры кабеля и проволоки. При анализе указанных решений непосредственной подстановкой нетрудно убедиться, что точность найденных решений не велика, характер сходимости полученных рядов не дает возможности достаточно точно оценивать искомые составляющие напряженности магнитного поля даже на границе проволоки. При использовании известного аналитического решения уравнения Гельмгольца такие несоответствия могут быть вызваны, по-видимому, погрешностями, связанными с аппроксимацией граничного условия.

Необходимость аппроксимации связана с желанием получить наиболее удобные формулы для численных расчетов, поскольку распределение компонент напряженности магнитного поля в стальной проволоке описывается довольно громоздкими выражениями.

Целью работы является повышение точности моделирования радиальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля с использованием полинома Чебышева.

Основной материал. При аппроксимации полиномом Лагранжа остаточный член полинома $E_n(\theta)$ определяется по следующей формуле [3]:

$$E_n(\theta) = \frac{(\theta - \theta_0)(\theta - \theta_1) \dots (\theta - \theta_n) f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!}, \quad (1)$$

где c – некоторая точка на промежутке $\theta \in [0; 2\pi]$ (для данного случая).

Следует отметить, что приведенная формула (1) справедлива для любой точки на промежутке, на котором определена функция, недостатком этой формулы является неудобство ее применения и недостаточная информативность, поскольку с ее помощью можно получить погрешность только в какой-либо определенной точке, поэтому на практике чаще применяют оценку для максимальной погрешности аппроксимации, которую можно получить из формулы (1).

Учитывая сказанное, чаще используется верхняя граница максимальной погрешности при использовании полинома Лагранжа.

$$E_n(\theta) \leq \frac{M_{n+1}}{(n+1)!} \max |\Pi_{n+1}(\theta)|, \quad (2)$$

где

$$\Pi_{n+1}(\theta) = (\theta - \theta_0)(\theta - \theta_1)(\theta - \theta_2) \dots (\theta - \theta_n), \quad (3)$$

то есть некоторый полином $n+1$ степени.

$$M_{n+1} = \max_{x \in [a, b]} |f^{(n+1)}(\theta)| \quad (4)$$

Таким образом, M_{n+1} – максимум производной $n+1$ порядка от функции которая аппроксимируется, на интервале ее определения.

Приведенные формулы для максимальной погрешности на интервале аппроксимации получают из выражения для остаточного члена полинома Лагранжа путем выбора наиболее неблагоприятных параметров в этом члене, то есть максимального значения производной $n+1$ степени от функции, которая аппроксимируется, а также максимума полинома $\Pi_{n+1}(\theta)$, однако поскольку, в общем случае, максимумы $\Pi_{n+1}(\theta)$ и M_{n+1} достигаются в различных точках интервала, то следует отметить что приведенная выше оценка не является наиболее точной, существуют более точные оценки максимальной погрешности, хотя и не настолько удобные в реализации.

Повышение точности интерполяции обычно обеспечивают при использовании полиномов Чебышева, которые определяются по следующей формуле (тригонометрическое представление):

$$T_n(x) = \cos(n \cdot \arccos x) \quad (5)$$

В формуле (5) $x \in [-1;1]$.

Известно, что для нахождения нулей полинома (5) (узлы Чебышева), на замкнутом интервале $x \in [-1;1]$ справедлива следующая формула [3]:

$$x_k = \cos\left(\frac{(2k+1)\pi}{2n}\right) \quad (6)$$

В формуле (6) $k = 0, 1, \dots, n-1$.

С использованием узлов Чебышева обеспечивают минимизацию верхней границы остаточного члена интерполяционного полинома, чем, соответственно, повышают точность аппроксимации. Поскольку в формуле (2) невозможно никаким образом регулировать значения M_{n+1} минимизация остаточного члена обеспечивается путем соответствующего выбора узлов интерполяции в полиноме $P_{n+1}(\theta)$. В качестве узлов интерполяции на интервале $[a;b]$ принимают узлы Чебышева [3]:

$$\theta_k = t_k \frac{b-a}{2} + \frac{a+b}{2}, \quad (7)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots, n$. В формуле (7) t_k – нули полинома Чебышева на интервале $[-1;1]$.

В формуле (7) при аппроксимации нули полинома Чебышева $n+1$ порядка можно находить с использованием формулы [3]:

$$t_k = \cos\left((2 \cdot N + 1 - 2 \cdot k) \frac{\pi}{2n+2}\right), \quad (8)$$

где $k = 0, 1, 2, 3, \dots, n$.

Полиномы Чебышева 6 и 7 порядка имеют вид [3]:

$$T_6(\theta) = 32\theta^6 - 48\theta^4 + 18\theta^2 - 1 \quad (9)$$

$$T_7(\theta) = 64\theta^7 - 112\theta^5 + 56\theta^3 - 7\theta \quad (10)$$

Учитывая известное рекуррентное соотношение для полиномов Чебышева [3]:

$$T_k(\theta) = 2\theta T_{k-1}(\theta) - T_{k-2}(\theta), \quad (11)$$

Можно записать выражение для, используемого в дальнейшем, полинома 8 порядка:

$$T_8(\theta) = 128\theta^8 - 256\theta^6 + 160\theta^4 - 32\theta^2 + 1 \quad (12)$$

На рис. 1 показано поведение полиномов (9, 10, 12), соответственно, кривая 1, кривая 2, кривая 3.

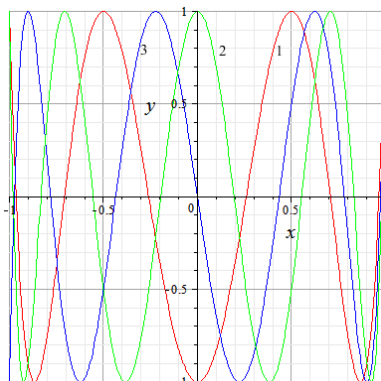


Рис. 1 – Полиномы Чебышева: $T_6(x)$ (кривая 1), $T_7(x)$ (кривая 2), $T_8(x)$ (кривая 3)

При аппроксимации полиномом 8 порядка использовались узлы, совпадающие с нулями полинома 9 порядка, на интервале $x \in [-1;1]$. Нули полинома 9 порядка, рассчитанные по формуле (8), на указанном выше интервале соответственно равны: $x_0 = -0,984807$, $x_1 = -0,866025$, $x_2 = -0,642787$, $x_3 = -0,342020$, $x_4 = 0$, $x_5 = 0,342020$, $x_6 = 0,642787$, $x_7 = 0,866025$, $x_8 = 0,984807$. Узлы интерполяции, пересчитанные для промежутка $\theta \in [0;2\pi]$ по формуле (7), равны: $\theta_0 = 0,0159\pi$, $\theta_1 = 0,13397\pi$, $\theta_2 = 0,357213\pi$, $\theta_3 = 0,65798\pi$, $\theta_4 = \pi$, $\theta_5 = 1,34202\pi$, $\theta_6 = 1,642787\pi$, $\theta_7 = 1,86602\pi$, $\theta_8 = 1,9848\pi$.

Геометрические параметры, используемые в дальнейшем при определении компонент напряженности магнитного поля, приведены на рис. 2.

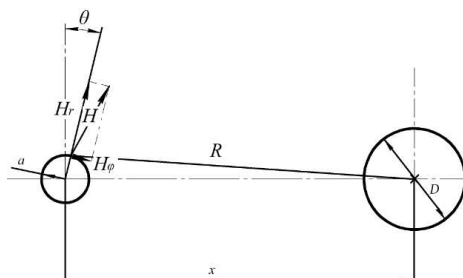


Рис. 2 – Схема к определению геометрических параметров для вычисления тангенциальной и радиальной составляющих напряженности магнитного поля на поверхности проволоки

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, радиальная и тангенциальная составляющие напряженности магнитного поля вычислялись из формул:

$$H_{\phi} = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{xa \sin \theta}{x^2 + a^2 - 2xa \sin \theta} \right) \quad (13)$$

$$H_r = \frac{I}{2\pi} \left(\frac{x \cos \theta}{x^2 + a^2 - 2xa \sin \theta} \right) \quad (14)$$

Формулы (13), (14) использовались в [4] для вычисления, соответственно, тангенциальной и радиальной составляющих напряженности магнитного поля на поверхности экранов трехфазного токопровода, при соединении экранов только с одной стороны, то есть при отсутствии продольных токов. Применение этих формул здесь оправдано, с учетом одинаковой геометрии, с точки зрения вычисления компонент напряженности поля на поверхности сплошной проволоки и полого экрана, в приближении плоскопараллельного поля. В дальнейшем расчеты будут проводиться при следующих геометрических параметрах, показанных на рис. 2, диаметр проволоки: $2a = 3$ мм, расстояние между осями проволоки и жилы кабеля $x = 27$ мм, диаметр жилы кабеля $D = 18$ мм. Ток жилы примем равным 100 А (действующее значение тока). В формулах (13), (14) учитывается действующее значение тока жилы, при рассмотрении полей, меняющихся по гармоническому закону, рассматривая в дальнейшем комплексные амплитуды напряженности магнитного поля и магнитной индукции в формулах (13), (14) будем учитывать амплитудное значение тока жилы. Кроме того, при определении напряженности магнитного поля на поверхности проволоки будем исходить из того что ток жилы и напряженность магнитного поля совпадают по фазе.

Аппроксимация полиномом Чебышева радиальной составляющей напряженности магнитного поля при использовании точек $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_8$ в качестве узлов интерполирования приведена на рис. 3. На этом же рисунке приведена аппроксимация полиномом Лагранжа, используемая в [2]. Значения параметра R (расстояние между центром жилы и текущей точкой поверхности), для указанных точек соответственно равны: $R_0 = 26,96$ мм, $R_1 = 26,42$ мм, $R_2 = 25,65$ мм, $R_3 = 25,65$ мм, $R_4 = 27$ мм, $R_5 = 28,35$ мм, $R_6 = 28,35$ мм, $R_7 = 27,64$ мм, $R_8 = 27,11$ мм.

Распределение радиальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности проволоки показано на рис. 3.

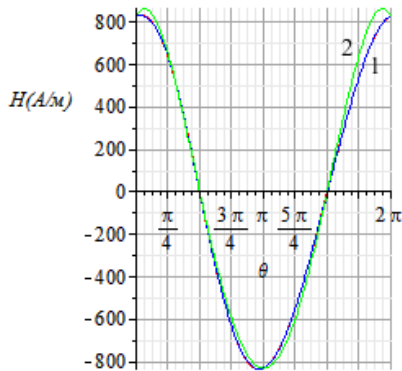


Рис. 3 – Распределение радиальной компоненты напряженности магнитного поля на поверхности проволоки: 1 – аппроксимация полиномом Чебышева и точное значение, 2 – аппроксимация полиномом Лагранжа

Кривые, приведенные на рис. 3, свидетельствуют об удачной аппроксимации. Применение полинома Чебышева здесь позволяет аппроксимировать граничное условие без существенных погрешностей.

Разность между двумя аппроксимирующими полиномами показана на рис. 4. Из данных, приведенных на указанном рисунке, следует весьма существенная разница в поведении двух полиномов так, при определении радиальной компоненты напряженности магнитного поля на поверхности проволоки разность между двумя полиномами в некоторых точках может превышать 100 А/м.

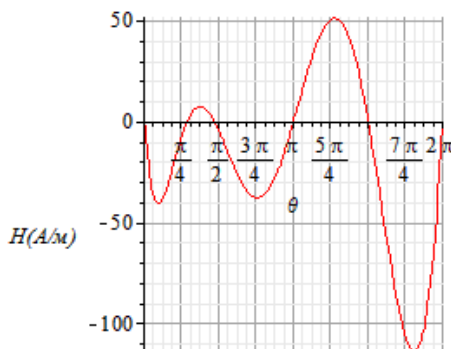


Рис. 4 – Разность между двумя аппроксимирующими полиномами

Распределение тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля на поверхности проволоки показано на рис. 4. При вычислении тангенциальной составляющей использовались те же узлы интерполяции, что и при аппроксимации радиальной составляющей.

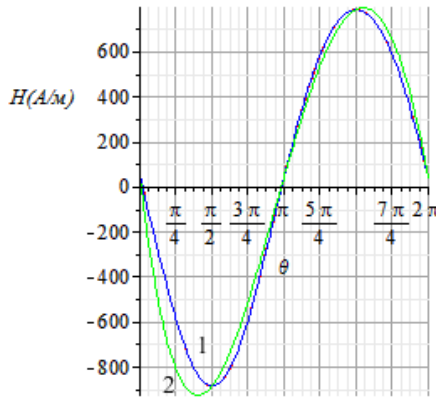


Рис. 5 – Распределение тангенциальной компоненты напряженности магнитного поля на поверхности проволоки: 1 – аппроксимация полиномом Чебышева и точное значение, 2 – аппроксимация полиномом Лагранжа

Разность между двумя аппроксимирующими полиномами показана на рис. 6.

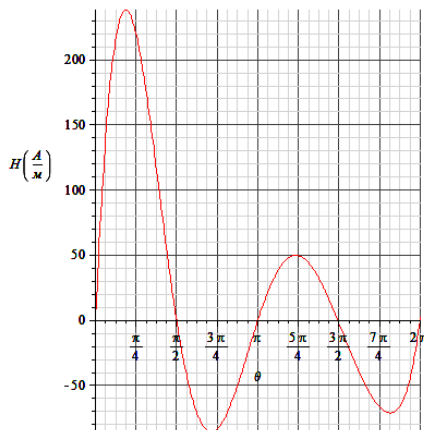


Рис. 6 – Разность между двумя аппроксимирующими полиномами

Как видно из данных, приведенных на рис. 6, разность между двумя аппроксимирующими полиномами может превышать 200 А/м.

Выводы. С помощью применения полиномов Чебышева удалось достигнуть достаточно точной аппроксимации распределения радиальной и тангенциальной компонент напряженности магнитного поля на поверхности проволоки брони силового кабеля. Приближающий интерполяционный полином 8 порядка, как видно из данных приведенных на рис. 3, и рис. 5, практически совпадает с точным значением приближаемых функций. Повышение точности аппроксимации здесь достигается путем соответствующего выбора узлов интерполяции.

Список литературы: 1. Костюков И.А. Продольные и вихревые токи в экранах и броне однофазных силовых кабелей / И.А. Костюков // Электрические сети и системы. – 2013. – № 5. – С. 76-80. 2. Костюков И. А. Приближенная оценка радиальной составляющей магнитной индукции и напряженности магнитного поля в стальной проволоке брони силового кабеля / И.А. Костюков // Вісник НТУ "ХПІ" Тематичний випуск: Енергетика: Надійність та енергоефективність. – 2013. – № 59 (1032). – С. 70-78. 3. Мэтьюз Д.Г. Численные методы. Использование MATLAB / Д.Г. Мэтьюз, К.Д. Финк. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 720 с. 4. Перекалин М. А. Исследование индуктированных токов в цилиндрических алюминиевых кожухах трехфазного токопровода / М.А. Перекалин, Р.И. Караев // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1960. – № 8. – С. 55-65.

Bibliography (transliterated): 1. Kostjukov I.A. "Prodol'nye i vihrevye toki v jekranah i brone odnofaznyh silovyh kabelej". *Jelektricheskie seti i sistemy*. No 5. 2013. 76-80. Print. 2. Kostjukov I.A. "Priblizhennaja ocenka radial'noj sostavljajushhej magnitnoj indukcii i naprjazhennosti magnitnog polja v stal'noj provoloke broni silovogo kabelja." *Visnik NTU "HPI". Ser.: Energetika: Nadijnist' ta energoeфективnist'*. No 59 (1032). Kharkiv: NTU "HPI", 2013. 70-78. Print. 3. Mjet'juz D.G., Fink K.D. *Chislennye metody. Ispolzovanie MATLAB*. Moscow: Izdatel'skij dom "Vil'jams", 2001. Print. 4. Perekalin M.A., Karaev R.I. "Issledovanie induktirovannyh tokov v cilindricheskih aljuminievych kozhuhah trehfaznogo tokoprovoda". *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jenergetika*. No 8. 1960. 55-65. Print.

Поступила (received) 23.04.2014

М.М. РЕЗИНКИНА, д-р техн. наук, вед.н.с., Институт технических проблем магнетизма НАН Украины, Харьков
В.С. ГРИНЧЕНКО, канд. техн. наук, м.н.с., Институт технических проблем магнетизма НАН Украины, Харьков
Н.В. КОНДУСОВА, канд. техн. наук, доц., Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОДНОРОДНОГО СТАТИЧЕСКОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОКРЕСТНОСТИ СТАЛЬНОЙ КОЛОННЫ

В статье исследованы методы описания искажения однородного статического магнитного поля в окрестности вытянутого сфероида, выполненного из однородного изотропного магнетика. Получены аналитические выражения для распределения магнитного поля в такой системе. Показано, что полученные аналитические выражения могут быть использованы для описания распределения геомагнитного поля при наличии стальной колонны.

Ключевые слова: аналитическая модель, однородное магнитное поле, сфероид, стальная колонна, COMSOL Multiphysics.

Введение. В последнее время большое внимание уделяется проблеме искажения геомагнитного поля (ГМП) стальными конструкциями современных зданий. В [1] представлен анализ допустимых уровней ослабления ГМП и приведены результаты измерений магнитного поля (МП) в жилых и общественных помещениях. Величина искажения ГМП определяется формой и магнитной проницаемостью ферромагнитных конструкций каркаса здания [2]. В [1] предложено рассматривать каркас здания как набор отдельных ферромагнитных элементов (колонн и балок). Если ферромагнитным элементом здания является полая труба, то при моделировании МП она может рассматриваться как однородная колонна с определенной магнитной проницаемостью [3]. В литературе приведены решения задачи об искажении ГМП отдельными ферромагнитными элементами, использующие численные методы: в [4] применялся метод фундаментальных решений, в [5, 6] – метод конечного интегрирования, в [1] распределение магнитной индукции было рассчитано в пакете COMSOL Multiphysics. В тоже время, ГМП является однородным статическим МП, и для некоторых геометрий ферромагнитных элементов распределение поля может быть описано аналитическим выражением.

Целью данной работы является получение аналитических выражений в элементарных функциях, позволяющих в рамках инженерной погрешности определять уровни искажения ГМП отдельными ферромагнитными элементами зданий (колоннами и балками). Для этого в представленной работе аналитически решается задача о вытянутом сфероиде из однородного изотропного магнетика, помещенного в однородное статическое МП. Далее проводится сравнение полученного распределения МП с распределением в окрестности цилиндрической колонны (ее высота равна длине большой оси сфероиде, радиус – малой полуоси сфероиде, магнитная проницаемость колонны равна магнитной проницаемости сфероиде), помещенной в то же внешнее МП.

Вытянутый сфероид в однородном магнитном поле. В работе рассмотрен вытянутый сфероид (a – большая полуось, b – малая полуось) с магнитной проницаемостью μ_1 , помещенный в среду с магнитной проницаемостью μ_2 . Напряженность внешнего однородного статического МП задана вектором $\vec{H}_0$. Декартова система координат введена следующим образом: начало системы координат совпадает с центром сфероиде, ось x направлена вдоль оси вращения вытянутого сфероиде, оси y и z расположены таким образом, чтобы $H_{0z} = 0$ (рис. 1).

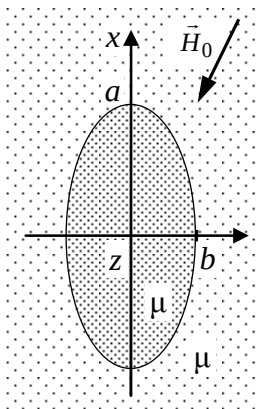


Рис. 1 – Введенная декартова система координат

Задача нахождения скалярного магнитного потенциала ϕ внутри и снаружи произвольного эллипсоида, помещенного в однородное МП, рассмотрена в [7]. Однако в общем случае в выражения для магнитного потенциала входят собственные интегралы, которые не могут быть вычислены аналитически.

Для рассматриваемого в данной работе вытянутого сфероиде в поле $\vec{H}_0$ выражения для скалярного магнитного потенциала внутри сфероиде ϕ^- и снаружи него ϕ^+ , приведенные в [7], имеют следующий вид:

$$\phi^- = - \frac{H_{0x} \cdot x}{1 + \frac{ab^2}{2} \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \cdot \int_0^{+\infty} \frac{ds}{(s + a^2) \cdot R_s}} - \frac{H_{0y} \cdot y}{1 + \frac{ab^2}{2} \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \cdot \int_0^{+\infty} \frac{ds}{(s + b^2) \cdot R_s}},$$

$$\begin{aligned} \varphi^+ = & -H_{0x} \cdot x \cdot \frac{1 + \frac{ab^2}{2} \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \cdot \int_0^{\xi} \frac{ds}{(s+a^2) \cdot R_s}}{1 + \frac{ab^2}{2} \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \cdot \int_0^{+\infty} \frac{ds}{(s+a^2) \cdot R_s}} - \\ & - H_{0y} \cdot y \cdot \frac{1 + \frac{ab^2}{2} \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \cdot \int_0^{\xi} \frac{ds}{(s+b^2) \cdot R_s}}{1 + \frac{ab^2}{2} \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \cdot \int_0^{+\infty} \frac{ds}{(s+b^2) \cdot R_s}}, \end{aligned}$$

где $R_s = \sqrt{s+a^2} \cdot (s+b^2)$;

$$\xi = \frac{x^2 + y^2 + z^2 - a^2 - b^2 + \sqrt{(x^2 - y^2 - z^2 - a^2 + b^2)^2 + 4x^2(y^2 + z^2)}}{2} -$$

эллипсоидальная координата ($\xi = \text{const}$ – семейство двуполостных гиперболоидов).

Напряженность МП $\vec{H}$ связана со скалярным магнитным потенциалом φ посредством выражения $\vec{H} = -\nabla\varphi$. Проводя дифференцирование φ^- и φ^+ , были найдены выражения для напряженности МП внутри вытянутого сфероида $\vec{H}^-$:

$$H_x^- = \frac{H_{0x}}{1 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{\mu_2} \cdot \frac{b^2}{a^2 - b^2} \cdot \left(-1 + \frac{a}{\sqrt{a^2 - b^2}} \cdot \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} \right)},$$

$$H_y^- = \frac{H_{0y}}{1 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{2\mu_2} \cdot \frac{a^2}{a^2 - b^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{a \cdot \sqrt{a^2 - b^2}} \cdot \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - b^2}}{b} \right)},$$

$$H_z^- = 0;$$

и вне его $\vec{H}^+$:

$$\begin{aligned}
H_x^+ = H_x^- & \cdot \left[1 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{2\mu_2} \cdot \left(\frac{2b^2}{a^2 - b^2} \cdot \left(-1 + \frac{a}{\sqrt{\xi + a^2}} \right) + \frac{ab^2 \cdot x \frac{\partial \xi}{\partial x}}{(\xi + a^2)^{3/2} \cdot (\xi + b^2)} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{ab^2}{(a^2 - b^2)^{3/2}} \cdot \ln \frac{(\sqrt{a^2 + \xi} - \sqrt{a^2 - b^2}) \cdot (a + \sqrt{a^2 - b^2})}{(\sqrt{a^2 + \xi} + \sqrt{a^2 - b^2}) \cdot (a - \sqrt{a^2 - b^2})} \right) \right] + \\
& + H_y^- \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{2\mu_2} \cdot \frac{ab^2 \cdot y \frac{\partial \xi}{\partial x}}{\sqrt{\xi + a^2} \cdot (\xi + b^2)^2}, \\
H_y^+ = H_x^- & \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{2\mu_2} \cdot \frac{ab^2 \cdot x \frac{\partial \xi}{\partial y}}{(\xi + a^2)^{3/2} \cdot (\xi + b^2)} + \\
& + H_y^- \cdot \left[1 + \frac{\mu_1 - \mu_2}{2\mu_2} \cdot \left(\frac{a^2}{a^2 - b^2} \cdot \left(1 - \frac{b^2 \cdot \sqrt{\xi + a^2}}{a \cdot (\xi + b^2)} \right) + \frac{ab^2 \cdot y \frac{\partial \xi}{\partial y}}{\sqrt{\xi + a^2} \cdot (\xi + b^2)^2} - \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{ab^2}{2(a^2 - b^2)^{3/2}} \cdot \ln \frac{(\sqrt{a^2 + \xi} - \sqrt{a^2 - b^2}) \cdot (a + \sqrt{a^2 - b^2})}{(\sqrt{a^2 + \xi} + \sqrt{a^2 - b^2}) \cdot (a - \sqrt{a^2 - b^2})} \right) \right], \\
H_z^+ = H_x^- & \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{2\mu_2} \cdot \frac{ab^2 \cdot x \frac{\partial \xi}{\partial z}}{(\xi + a^2)^{3/2} \cdot (\xi + b^2)} + H_y^- \cdot \frac{\mu_1 - \mu_2}{2\mu_2} \cdot \frac{ab^2 \cdot y \frac{\partial \xi}{\partial z}}{\sqrt{\xi + a^2} \cdot (\xi + b^2)^2},
\end{aligned}$$

где частные производные эллипсоидальной координаты ξ выражаются через декартовы координаты x , y и z следующим образом:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial x} &= x \cdot \left(1 + \frac{x^2 + y^2 + z^2 - a^2 + b^2}{\sqrt{(x^2 - y^2 - z^2 - a^2 + b^2)^2 + 4x^2(y^2 + z^2)}} \right), \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} &= y \cdot \left(1 + \frac{x^2 + y^2 + z^2 + a^2 - b^2}{\sqrt{(x^2 - y^2 - z^2 - a^2 + b^2)^2 + 4x^2(y^2 + z^2)}} \right), \\ \frac{\partial \xi}{\partial z} &= z \cdot \left(1 + \frac{x^2 + y^2 + z^2 + a^2 - b^2}{\sqrt{(x^2 - y^2 - z^2 - a^2 + b^2)^2 + 4x^2(y^2 + z^2)}} \right). \end{aligned} \right.$$

Полученные выражения записаны в элементарных функциях и описывают распределение напряженности МП вокруг вытянутого сфероида, помещенного в однородное статическое МП.

Магнитная индукция внутри и вне сфероида равна, соответственно, $\vec{B}^- = \mu_1 \mu_0 \vec{H}^-$ и $\vec{B}^+ = \mu_2 \mu_0 \vec{H}^+$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Цилиндр в однородном магнитном поле. Для проверки возможности применения полученных выражений для описания искажения ГМП ферромагнитной колонной были приняты следующие параметры системы [1]: длина цилиндрической колонны – $10d$, радиус – $d/2$, где d – длина в относительных единицах, магнитная проницаемость колонны – 100. Полагалось, что колонна располагается в ГМП, вертикальная составляющая которого равняется 46,6 мкТл, горизонтальная – 18,1 мкТл. Распределение магнитного поля в окрестности колонны рассчитано в пакете COMSOL Multiphysics [8]. Для этого была построена трехмерная модель, использовался решатель "Magnetic Fields, No Currents (*mfnc*)", расчетная область представляла собой цилиндр радиусом $15d$ и высотой $40d$ (рис. 2), для ограничения расчетной области использовалась техника "Infinite Element Domains" (IED), толщина IED-области была положена равной $5d$, в модели использовались сетки типа "Free Triangular" и "Mapped" размера "Extra fine" (максимальный размер элемента сетки равнялся $1,4d$, минимальный – $0,06d$). Правильность полученного численного решения была проверена путем его сравнения с решением, получаемым при двойном увеличении размеров расчетной области, и решением, получаемым при использовании более грубой сетки.

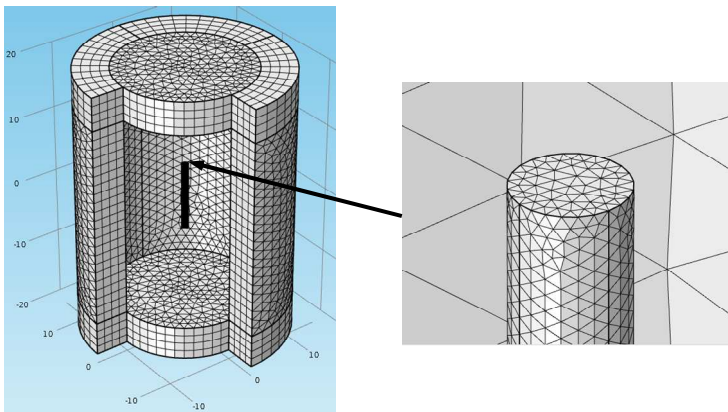


Рис. 2 – Трехмерная модель цилиндрической колонны

Для сравнения результатов численного моделирования с аналитическим расчетом, проведенным для вытянутого сфероида, в полученные в предыдущем разделе выражения были подставлены следующие величины: $a=5d$ (большая полуось сфероида равна половине высоты колонны), $b=d/2$ (малая полуось равна радиусу колонны), $\mu_1=100$ (магнитные проницаемости сфероида и цилиндрической колонны равны), $\mu_2=1$ (для воздушного пространства), $B_{0x}=-46,6$ мкТл, $B_{0y}=-18,1$ мкТл.

На рис. 3 представлены распределения изменения ГМП в относительных единицах ($B_0=50$ мкТл – модуль магнитной индукции ГМП, B – модуль магнитной индукции при внесении в ГМП ферромагнитного элемента): "треугольники" на графиках соответствуют распределению, рассчитанному в пакете COMSOL Multiphysics, сплошные кривые построены при помощи аналитических выражений. Зависимости построены в точках с координатами $x = 0, z = 0$ (рис. 3, а), $x = 2,5d, z = 0$ (рис. 3, б), $x = 5d, z = 0$ (рис. 3, в), $x = 7,5d, z = 0$ (рис. 3, г). Наилучшее совпадение результатов численного моделирования распределения МП при наличии цилиндрической колонны и результатов аналитического расчета распределения МП при наличии вытянутого сфероида наблюдается в центральной области колонны/сфероида (рис. 3, а, б) и в области над этими элементами (рис. 3, г). Замена цилиндрической колонны вытянутым сфероидом (с соответствующими величинами полуосей) вносит погрешность при определении МП в точках этих областей, не превышающую 8 %. В точках, расположенных возле оснований колонны (возле полюсов вытянутого сфероида), погрешность при определении величины МП выше (рис. 3, в). Тем не менее, при удалении

от оси вращения более чем на удвоенный радиус колонны погрешность становится меньше 10 %.

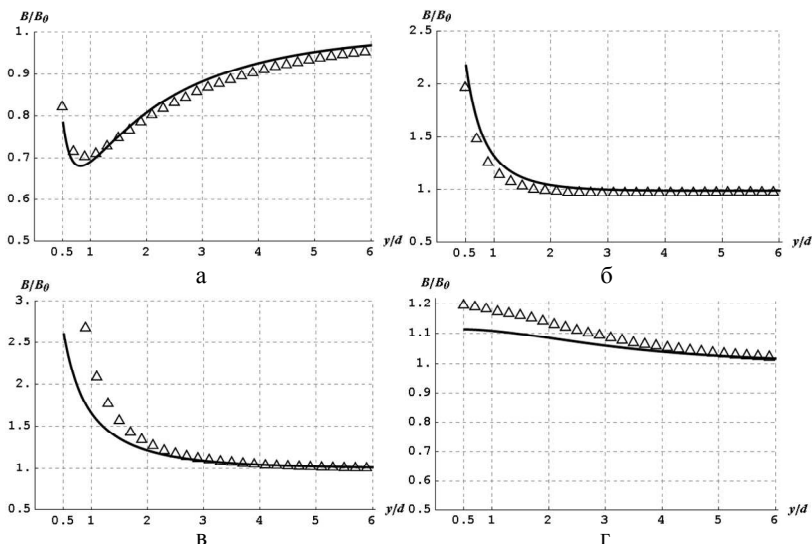


Рис. 3 – Распределения изменения ГМП в относительных единицах построены в точках с координатами: а – $x = 0, z = 0$; б – $x = 2,5d, z = 0$; в – $x = 5d, z = 0$; г – $x = 7,5d, z = 0$.

Выводы. В работе представлено аналитическое решение задачи о распределении МП вокруг вытянутого сфероида, помещенного в однородное статическое МП. Показано, что полученные выражения могут быть использованы для нахождения искажения ГМП стальной колонной. Причем при замене колонны (высоты h , радиуса r) вытянутым сфероидом (с полуосями $a=h/2$ и $b=r$) погрешность в области, удаленной от оси вращения цилиндра/сфероида более чем на $2r$, не превышает 10 %.

Список литературы: 1. Розов В.Ю. Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях / В.Ю. Розов, Д.Е. Пелевин, С.В. Левина // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2013. – №6. – С. 76-80. 2. Розов В.Ю. Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня / В.Ю. Розов, М.М. Резинкина, Ю.Д. Думанский, Л.А. Гвозденко // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки"*. – 2008. – Ч. 2. – С. 3-8. 3. Розенблат М.А. Коэффициенты размагничивания стержней высокой проницаемости / М.А. Розенблат // *Журнал технической физики*. – 1954. – Т. XXIV, Вып. 4. – С. 637-661. 4. Розов

В.Ю. Исследование явления ослабления статического геомагнитного поля стальной колонной / В.Ю. Розов, С.Ю. Реуцкий, С.В. Левина // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – № 1. – С. 12-19. 5. Резинкина М.М. Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки / М.М. Резинкина // *Электричество*. – 2005. – № 1. – С. 44-49. 6. Резинкина М.М. Численное исследование магнитного поля разноразмерных объектов / М.М. Резинкина, В.С. Гринченко, Л.Э. Лобжанидзе // *Технічна електродинаміка*. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч.1. – С. 189-192. 7. Страттон Дж.А. Теория электромагнетизма / Дж.А. Страттон. – М.-Л.: ОГИЗ Гос-техиздат, 1948. – 539 с. 8. Pryor R.W. Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach / R.W. Pryor // – Jones & Bartlett Publishers, 2009. – 852 p.

Bibliography (transliterated): 1. Rozov V.Ju., Pelevin D.E., Levina S.V. "Experimental investigations of phenomena of static geomagnetic field reducing in premises". *Electrical Engineering & Electromechanics*. No. 6. 2013. 76-80. Print. 2. Rozov V.Ju., Rezinkina M.M., Dumansky Ju.D., Gvozdenko L.A. "Investigation of geomagnetic field technogenic aberrations in lodgings and industrial premises and determination of ways of their decrease to safety levels". *Technical Electrodynamics*. Part 2. 2008. 3-8. Print. 3. Rozenblat M.A. "Demagnetization factors of high-penetration bars". *Journal of Technical Physics*. Vol. XXIV, Issue 4. 1954. 637-661. Print. 4. Rozov V.Ju., Reutsy S.Ju., Levina S.V. "Investigation of phenomena of static geomagnetic field reducing by a steel column". *Technical Electrodynamics*. No. 1. 2014. 12-19. Print. 5. Rezinkina M.M. "Calculation of 3D electric field in systems with thin wires". *Electricity*. No. 1. 2005. 44-49. Print. 6. Rezinkina M.M., Grinchenko V.S., Lobzhanidze L.E. "Numerical investigation of magnetic field of objects with different dimensions". *Technical Electrodynamica*. Part. 1. 2010. 189-192. Print. 7. Stratton J.A. *Electromagnetic Theory*. New York, London: McGraw-Hill, 1941. Print. 8. Pryor R.W. *Multiphysics Modeling Using COMSOL: A First Principles Approach*. Jones & Bartlett Publishers. 2009. Print.

Поступила (received) 05.05.2014

В.В. ЛЕВКОВ, ад'юнкт Національної академії
Держприкордонслужби України, м. Хмельницький

**МЕТОДИКА СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ ПІДСИСТЕМ
УТИЛІТ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОХОРОНИ КОРДОНУ**

Запропоновано методику визначення множини раціональних структур підсистем утиліт систем електрозабезпечення технічних засобів охорони кордону на основі використання потенціалу відновлюваних джерел енергії. Обґрунтовано, що кількісний та якісний склад підсистеми утиліт доцільно визначати за допомогою апарату алгебри логіки, шляхом використання формалізованих тотожностей логічних висловлювань. Методика може використовуватись для отримання множини альтернативних наборів утиліт, що у перспективі забезпечить створення науково-методичного апарату з генерування оптимальних структур систем електроживлення технічних засобів охорони кордону.

Ключові слова: система електрозабезпечення, відновлювані джерела енергії, структурний синтез, утиліти, методика.

Вступ. Сучасний стан безпекового середовища України характеризується динамічно зростаючою напруженістю, доповненням глобальних викликів та загроз регіональним і геополітичним суперництвом, кризовими проявами в системі міжнародних відносин та активною експлуатацією внутрішніх проблем держави зовнішніми силами [1]. Потенційні виклики та загрози все більше набувають реального характеру, особливо щодо порушення державного суверенітету, територіальної цілісності та недоторканності кордонів України. А отже, створюються сприятливі умови щодо здійснення різних видів незаконної транскордонної діяльності, найбільшу небезпеку з яких має переправлення зброї, боєприпасів, вибухових речовин, інших засобів терору та ведення бойових дій, а ймовірно – і зброї масового ураження. При цьому, проявляються спроби провокацій та негативного впливу на персонал правоохоронних органів і військових формувань. Такі умови обстановки, з одного боку, ускладнюють функціонування системи забезпечення прикордонної безпеки, а з іншого – обумовлюють необхідність підвищення вимог до виконання завдань відповідальними органами. Зважаючи на це, керівництву виконавчих органів державної влади сектору національної безпеки необхідно приймати виважені, однак перспективні (навіть, інноваційні) рішення щодо напрямів реалізації політики в контексті задекларованого зовнішньополітичного

курсу держави на формування спільного з Європою безпекового середовища.

Значна робота у цьому напрямі вже проведена і в Державній прикордонній службі України, зокрема, щодо переоснащення парку технічних засобів охорони кордону (ТЗОК) на зразки нового покоління.

Однак, складно підвищувати ефективність функціонування системи охорони кордону при наявній обмеженості ресурсного забезпечення (перш за все, енергетичного та фінансового). Зокрема, широке застосування ТЗОК (з метою створення вздовж лінії державного кордону суцільних за простором та часом зон візуального, радіотехнічного, інфрачервоного та інших видів спостереження, що передбачено концепцією [2]), потребує безперерйного функціонування їх систем електрозабезпечення (СЕЗ). Проблеми, пов'язані з постачанням електричної енергії для живлення елементів системи технічного контролю державного кордону (вони описані у роботі [3]) можна віднести до внутрішніх загроз прикордонній безпеці. Також в роботі [3] висунуто гіпотезу про те, що задовольнити енергетичні потреби (досягнути енергонезалежності) ТЗОК можливо шляхом використання потенціалу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Зокрема, щодо потреб Держприкордонслужби на увагу заслуговують перетворювачі сонячної, вітрової, геотермальної енергії, енергії річок та морських хвиль.

Справедливість гіпотез, аналогічних висунутій, доведено у багатьох джерелах (зокрема [4, 5]) на прикладах забезпечення електроенергією споживачів у різних сферах життєдіяльності людства. Стосовно ж порядку організації електрозабезпечення технічних засобів охорони кордону на основі використання потенціалу (ОВП) ВДЕ автором проведено роботу щодо змістовного опису та обґрунтування математичної моделі генерації раціональних структур підсистем первинних перетворювачів систем електрозабезпечення ТЗОК. На сьогоднішній день триває апробація цього науково-методичного апарату та проводиться експериментальне (дослідне) тестування.

Наступним кроком проектування системи автономного електрозабезпечення технічних засобів охорони кордону на ОВП ВДЕ є розробка методики структурного синтезу підсистеми утиліт, за допомогою якої здійснюється отримання та перетворення електричної енергії від підсистеми первинних перетворювачів, а також її накопичення та транзит до кінцевих споживачів. Відповідно, ця підсистема структурно є проміжною між первинними перетворювачами та технічними засобами

охорони кордону (рис. 1). При цьому структуру підсистеми утиліт вважатиме раціональною, якщо її елементи, щонайменше, відповідають умовам функціональної придатності, стійкості, та достатності.

Означимо, що придатність характеризує елементи підсистеми утиліт СЕЗ щодо їх відповідності вимогам якості, які до них висуваються. Достатність – підсистема утиліт СЕЗ має гарантовано забезпечувати встановлений графік електропостачання ТЗОК. Стійкість – елементи підсистеми утиліт СЕЗ мають функціонувати у визначених умовах експлуатації, а також мати можливість сумісної роботи.



Рис. 1 – Структурна схема локальної СЕЗ на ОВП ВДЕ

У результаті аналізу досліджень та робіт [6-8] автором встановлено, що задачі структурного синтезу технічних об'єктів різних класів можуть бути розв'язані з використанням математичного апарату алгебри логіки. Але для реалізації логічних операцій необхідно формалізувати у булевому просторі (створивши відповідні матриці початкових даних) актуальні умови багатофакторності: параметри та функції окремих елементів підсистеми утиліт та зовнішнього середовища, обмеження та специфіку порядку використання ТЗОК тощо.

Отже, **метою статті** є обґрунтування методики структурного синтезу підсистем утиліт систем електрозабезпечення ТЗОК на основі використання потенціалу відновлюваних джерел енергії.

Постановка завдання. Для досягнення мети в роботі вирішено такі завдання:

- сформульовано загальний алгоритм опису методики;
- визначено початкові данні, які характеризують множину елементів підсистеми утиліт; формалізовано їх локальні функції, вимоги та обмеження;
- розроблено цільову функцію щодо генерації раціональних структур підсистем утиліт СЕЗ ТЗОК на ОВП ВДЕ.

Результати досліджень. Основні етапи вирішення визначених завдань структурного синтезу підсистем утиліт СЕЗ ТЗОК на ОВП ВДЕ в рамках пропонованої методики вбачається доцільним представити у вигляді наступного переліку:

1. Визначення функцій підсистеми утиліт та формалізація масиву початкових даних для генерації альтернативних раціональних структур підсистеми утиліт.

2. Формалізація цільової функції генерації альтернативних раціональних структур підсистеми утиліт.

3. Формалізація системи обмежень за показниками:

3.1. Придатності (характеристиками якості);

3.2. Стійкості у визначених умовах експлуатації (допустимі діапазони температури, вологості тощо);

3.3. Достатності щодо гарантованого задоволення енергетичних потреб кінцевих споживачів (характеристики струму: напруга, її вид, потужність, частота, модуляція, синусоїдальність).

4. Побудова загального переліку альтернативних елементів підсистеми утиліт. Згідно кожної функції визначається марочний склад тих елементів (див. п. 1), які можуть забезпечити її виконання. Далі здійснюється заповнення матриці відповідними значеннями початкових даних для генерації альтернативних раціональних структур підсистеми утиліт.

5. Відбір елементів підсистеми утиліт за системою обмежень п. 3 – присвоєння булевим змінним елементів відповідних значень: "1" або "0".

На даному етапі відбувається відбір лише тих елементів підсистеми утиліт СЕЗ, які (а) за частковими показниками якості будуть обов'язково відповідати вимогам стандартів якості, які до них висуваються, (б) стійко працювати у визначених умовах експлуатації, а також мати можливість сумісної роботи, (в) гарантовано задовольняти енергетичні потреби кінцевих споживачів (ТЗОК).

6. Застосування цільової функції (згідно п. 2) та правил мінімізації булевих функцій з метою генерації альтернативних раціональних структур підсистеми утиліт.

Разом із цим, зазначений перелік скорочено можна представити як алгоритм послідовних дій, зображений на рис. 2.

Відповідно до п.п. 1,2 альтернативні структури будуть складатись з сукупності утиліт, функції яких забезпечуватимуть вхідні параметри електроенергії для ТЗОК. Такими функціями утиліт будемо вважати: комутацію електроенергії, що отримується з первинних перетворювачів; функцію заряджання пристроїв акумуляції енергії; функцію накопичення та зберігання енергії; перетворення характеристик енергії до необхідних параметрів, тощо.



Рис. 2 – Загальний алгоритм опису методики структурного синтезу підсистем утиліт систем електрозабезпечення ТЗОК на ОВП ВДЕ

Згідно п. 3 формалізацію обмежень проведемо через їх об'єднання у групи за фізичною суттю та часовим розподілом впливу:

обмеження 1-го роду (п.п. 3.1) – це числові та лінгвістичні характеристики, яким повинні обов'язково відповідати всі утиліти; дана група обмежень відображає загальний (концептуальний) підхід щодо використання утиліт (у структурі підсистеми);

обмеження 2-го роду (п.п. 3.2) – це параметри умов функціонування утиліт; дана група обмежень являє собою набір характеристик певних ділянок місцевості та їх значень в окремі періоди року та доби, що визначають можливість нормального функціонування підсистеми на конкретних ділянках відповідальності підрозділу охорони кордону;

обмеження 3-го роду (п.п. 3.3) – це нормативні значення показників виконання завдань, що покладаються на підсистему утиліт (в складі СЕЗ).

Таблиця 1 – Множина допустимих елементів підсистем утиліт СЕЗ

Елементи підсистем утиліт СЕЗ на ОВП ВДЕ			Локальні функції утиліт СЕЗ на ОВП ВДЕ, х							
№ з/п	Вид (m)	Марка (n)	1	2	3	4	5	6	...	X
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Перетворювачі (П)	П1	$b_{1/1}^{(1)}$							
		П2	$b_{1/2}^{(1)}$							
		...	...							
		ПN	$b_{1/N}^{(1)}$							
2	Зарядні пристрої (З)	З1		$b_{2/1}^{(2)}$						
		З2		$b_{2/2}^{(2)}$						
		...		...						
		ЗN		$b_{2/N}^{(2)}$						
3	Пристрої акумуляції електроенергії (А)	А1			$b_{3/1}^{(3)}$					
		А2			$b_{3/2}^{(3)}$					
		...			...					
		АН			$b_{3/N}^{(3)}$					
4	Інвертори (Ін)	Ін1				$b_{4/1}^{(4)}$				
		Ін2				$b_{4/2}^{(4)}$				
		...				...				
		ІнN				$b_{4/N}^{(4)}$				
5	Контролери (К)	К1					$b_{5/1}^{(5)}$			
		К2					$b_{5/2}^{(5)}$			
		...					...			
		КN					$b_{5/N}^{(5)}$			
6	Стабілізатори (С)	С1						$b_{6/1}^{(6)}$		
		С2						$b_{6/2}^{(6)}$		
		...						...		
		СN						$b_{6/N}^{(6)}$		
...	...	...							...	
М	М	М1								$b_{M/1}^{(X)}$
		М2								$b_{M/2}^{(X)}$
		...								...
		МN								$b_{M/N}^{(X)}$

На етапі відпрацювання п. 4, як основного у алгоритмі опису методики, множину допустимих складових підсистем утиліт та їх модифікацій у сукупній структурі СЕЗ необхідно представити у вигляді табл. 1.

Формування теоретично можливих варіантів структур підсистеми утиліт СЕЗ на ОВП ВДЕ здійснюємо за допомогою апарату алгебри логіки, що дозволяє істотно скоротити кількість завідомо нерациональних математичних операцій шляхом використання таких тотожностей логічних висловлювань [9], як:

комутативність: $a \wedge b \equiv b \wedge a$, $a \vee b \equiv b \vee a$;

дистрибутивність: $a \wedge (b \vee c) \equiv (a \wedge b) \vee (a \wedge c)$, $a \vee (b \wedge c) \equiv (a \vee b) \wedge (a \vee c)$;

ідемпотентність: $a \wedge a \equiv a$, $a \vee a \equiv a$;

поглинання $(a \wedge b) \vee a \equiv a$, $(a \vee b) \wedge a \equiv a$.

Використовуючи зазначене, загальне подання математичного апарату методики постає у вигляді цільової функції, що характеризує всі можливі структури підсистеми утиліт СЕЗ на ОВП ВДЕ, при гарантованому виконанні всіх функцій, які покладаються на окремі елементи та набуває наступного вигляду:

$$z(1...x...X) = f(b_{m/n}^{(x)}) = \bigotimes_{x=1, m=1, n=1}^{X, M, N} b_{m/n}^{(x)} = \bigwedge_{x=1}^X \left(\bigvee_{m=1, n=1}^{M, N} b_{m/n}^{(x)} \right), \quad (1)$$

звідки:

$$\begin{aligned} z(1...X) &= (b_{I_1}^{(1)} \vee b_{I_2}^{(1)} \vee \dots \vee b_{I_n}^{(1)} \vee \dots \vee b_{I_N}^{(1)}) \wedge \\ &\wedge (b_{3_1}^{(2)} \vee b_{3_2}^{(2)} \vee \dots \vee b_{3_n}^{(2)} \vee \dots \vee b_{3_N}^{(2)}) \wedge \dots \wedge \\ &\wedge (b_{m/1}^{(x)} \vee b_{m/2}^{(x)} \vee \dots \vee b_{m/n}^{(x)} \vee \dots \vee b_{m/N}^{(x)}) \wedge \dots \wedge \\ &\wedge (b_{C_1}^{(X)} \vee b_{C_2}^{(X)} \vee \dots \vee b_{C_n}^{(X)} \vee \dots \vee b_{C_N}^{(X)}), \end{aligned}$$

за умов $b_{m/n}^{(x)} \neq 0$,

де $z(x)$ – функція, що характеризує всі варіанти компоновки у x -му стовпці таблиці при $b_{m/n}^{(x)} \neq 0$; $b_{m/n}^{(x)}$ – булева змінна для визначеної x -ї функції утиліт, яка може бути виконана елементом підсистеми m -го виду n -ї марки ($x = (1...X)$, $m = (1...M)$, $n = (1...N)$, $b_{m/n}^{(x)} = \{1; 0\}$); $\otimes$ – знак логіко-функціональної залежності між рядками та стовпцями матриці булевого простору.

В подальшому, описаний математичний інструментарій (1) дозволяє на завершальних етапах, зазначених у п.п. 5,6 (рис. 2), за до-

помогою електронно-обчислювальної техніки отримати множину раціональних структур підсистем утиліт СЕЗ технічних засобів охорони кордону на основі використання потенціалу відновлюваних джерел енергії, а також забезпечить спрощення завдання щодо здійснення загальної оцінки енергетичних та економічних характеристик генерованих наборів обладнання.

Висновки і напрями подальших досліджень. Таким чином, у статті запропоновано методику структурного синтезу підсистем утиліт систем електрозабезпечення на основі використання потенціалу відновлюваних джерел енергії. Безпосередньо як науковий інструментарій генерації раціональних структур підсистем утиліт в методиці застосовано математичний апарат алгебри логіки в частині формування та мінімізації булевих функцій. При цьому раціональність отриманих структур визначається відповідністю властивостям функціональної придатності, стійкості та достатності.

Оприлюднені у даній роботі результати досліджень, разом із раніше обґрунтованою математичною моделлю генерації раціональних структур підсистем первинних перетворювачів, є підґрунтям для подальшого опрацювання комплексної методики синтезу структури СЕЗ, яка гарантовано забезпечуватиме встановлений графік електропостачання з відповідними параметрами струму з метою використання технічних засобів в охороні кордону.

Список літератури: 1. *Купрієнко Д.А.* Аналіз проблеми розвитку інтегрованого управління кордонами в Україні / *Д.А. Купрієнко, Ю.А. Дем'янюк* // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Міжнар. наук.-техн. конф., 4-16 травня 2014 р.: тези доп. – Львів, 2014. – С. 139. 2. Указ Президента України від 19.06.06 № 546/2006 "Про Концепцію розвитку Державної прикордонної служби України на період до 2015 р." – К.: АДПСУ, 2006 р. 3. *Купрієнко Д.А.* Перспективи впровадження альтернативних джерел електроенергії у контексті забезпечення прикордонної безпеки України / *Д.А. Купрієнко, В.В. Левков, В.А. Собченко* // Збірн. наук. пр. Серія: військові та технічні науки / Нац. академія Держприкордонслужби України. – Хмельницький, 2012. – Вип. 57. – С. 116-121. 4. Вітроенергетичні системи малої потужності // Зелена енергетика. – 2004. – №1 (13). – С. 14-16. 5. *Коробко Б.П.* Сонце і вітер для сільського двору й дачного котеджу / *Б.П. Коробко, О.С. Глущенко, В.І. Шевчук* // Ринок інсталяцій. – № 2. – С. 32. 6. *Анкудинов Г.И.* Синтез структуры сложных объектов. Логико-комбинаторный подход / *Г.И. Анкудинов*. – Ленинград: Издательство Ленинградского университета, 1986. – 260 с. 7. *Боровик О.В.* Методика синтезу системи технічного контролю державного кордону в умовах однорідності параметрів середовища функціонування / *О.В. Боровик, Д.А. Купрієнко* // Зб. наук. пр. "Труди академії" / за ред. І.С. Руснака. – К.: НАОУ, 2007. – №7 (80). – С. 186-194. 8. *Цвиркун А.Д.* Структура многоуровневых крупномасштабных систем. Синтез и планирование развития / *А.Д. Цвиркун, В.К. Акинфиев*. – М.: Наука, 1993. – 160 с. 9. *Кравченко В.Ф.* Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях / *В.Ф. Кравченко, В.Л. Рвачев*. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 416 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kupriyenko, D.A. and Yu.A. Dem'yanyuk. "Analiz problemy rozvytku integrovanogo upravlinnya kordonamy v Ukraini." Mizhnar. nauk.-texn. konf. "Perspektyvy rozvytku ozbroynenya ta vijskovoyi tekhniki Suxoputnyx vijsk". Lviv: tezy dop., 2014. 4-16 May 2014. 139. Print. 2. "Pro Konceptiyu rozvytku Derzhavnoyi pry kordonnoyi sluzhby Ukrainy` na period do 2015". Ukaz Prezydenta Ukrainy`. Ky`yiv: ADPSU, 2006. No. 546/2006. 19 June 2006. Print. 3. Kupriyenko, D.A., V.V. Levkov and V.A. Sobchenko. "Perspektyvy vprovadzhennya alternatyvnyx dzherel elektroenergiyi u konteksti zabezpechennya prykordonnoyi bezpeky Ukrainy." Zbirn. nauk. pr. Nacz. akademiya Derzhprykordonsluzhby Ukrainy. Ser.: vijskovi ta tekhnichni nauky. Xmelnyczkyj: No. 57. 2012. 116-121. Print. 4. "Vidroenergetychni systemy maloyi potuzhnosti". Zelena energetyka. No. 1 (13). 2004. P. 14-16. Print. 5. Korobko, B.P., O.S. Glushhenko and V.I. Shevchuk. "Sonce i viter dlya silskogo dvoru i dachnogo kotedzhu". Rynok instaljacyj. No. 2. 32. Print. 6. Ankudinov, G. I. "Sintez struktury slozhnyx ob'ektov. Logiko-kombinatornyj podhod". Leningrad: Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta. 1986. 260. Print. 7. Borovy`k, O.V. and D.A. Kupriyenko. "Metody`ka sy`ntezy sy`stemy` tekhnichnogo kontrolyu derzhavnogo kordonu v umovax odnorodnosti parametriv seredovy`shha funkcionuvannya." Zbirn. nauk. pr. "Trudy` akademiyi". Ky`yiv: NAOU, 2007. No. 7 (80). 2007. P. 186-194. Print. 8. Cvirkun, A.D., and V.K. Akinfiev. "Struktura mnogourovnevnyx krupnomasshtabnyx sistem. Sintez i planirovanie razvitija". Moskva: Nauka, 1993. 160. Print. 9. Kravchenko, V.F., and V.L. Rvachev. "Algebra logiki, atomanye funkcii i vejvlety v fizicheskix prilozhenija". Moskva: FIZMATLIT, 2006. 416. Print.

Надійшла (received) 10.04.2014



Левков Володимир Васильович, у 2001 р. закінчив навчання у Національній академії прикордонних військ України ім. Б.Хмельницького (м. Хмельницький) з отриманням диплому спеціаліста (спеціальність "Автомобілі та автомобільне господарство").

У 2011 році вступив до ад'юнктури при Національній академії Держприкордонслужби України з метою написання та захисту дисертації на здобуття вченого звання кандидата технічних наук.

Наукові інтереси пов'язані із вирішенням завдань щодо підвищення ефективності використання технічних засобів в охороні державного кордону.

РЕФЕРАТИ

УДК 621.318

Вплив температури нагріву контактної системи вакуумного вимикача на статичні напруги в матеріалі вакуумного сільфону / Є.І.Байда // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 3-7. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

У статті розглянуто вплив температури нагріву контактної системи на внутрішні напруження в сільфоні вакуумного вимикача методом кінцевих елементів. Полу-Чена залежність механічних напружень у матеріалі у функції температури при заданому ході контактів. Показано, що найбільші механічні навантаження відчують місця кріплення сільфона до контактів і вакуумній камері. Значення механічних напружень в аварійних режимах роботи можуть перевищувати межу плинності при не-правильно вибраному матеріалі сільфона.

Ключові слова: вакуумний сільфон, термомеханічна напруга.

УДК 621.315

Аналіз мікропроцесорного терміналу шафи керування обігрівом тунелів метрополітену // Ю.С. Гришук, С.Л. Зусько // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 8-12. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведено аналіз функцій мікропроцесорного терміналу, розглянуті особливості роботи чотирьох аналогових струмових входів та чотирьох аналогових входів напруги пристроїв 7SJ624 і 7SJ64. Викладені особливості дискретних входів і виходів послідовних інтерфейсів. Розглянуто окремий сервісний інтерфейс для обліку даними з віддаленим центром через персональний комп'ютер та послідовний системний інтерфейс для роботи з різними протоколами і передачі даних в центральну систему контролю та керування.

Ключові слова: мікропроцесорний термінал, шафа керування, мікроконтролер.

УДК 621.3

Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит // М.Г. Пантелія, Ю.В. Гуренцов, А.В. Трофімов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 13-24. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

В статті запропонована методика розрахунку індуктора – основного конструктивного елемента індукційної кухонної плити. Представлена в роботі методика розроблена на основі інженерних методів розрахунку плоских індукторів промислових індукційних нагрівачів з урахуванням особливостей та режимів роботи індукційних кухонних плит. Виконано розрахунки індукторів стосовно до ряду режимів нагрівання посуду різних геометричних розмірів. Проаналізовано отримані результати.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, індуктор, розрахунок.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Порівняння електромеханічних показників індукційно-динамічного та електромагнітного двигунів / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 20 (1063). – С. 25-35. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведено порівняння електромеханічних показників індукційно-динамічного двигуна та електромагнітного двигуна, призначених для роботи в якості актуатора електрич-

них комутаційних апаратів. Для порівняння обрані двигуни з однаковими масогабаритними параметрами при використанні смісного накопичувача енергії та електронної системи, що формує аперіодичний імпульс струму. Показні переваги індукційно-динамічного двигуна за швидкісними показниками по відношенню до електромагнітного двигуна.

Ключові слова: індукційно-динамічний двигун, електромагнітний двигун, актуатор, швидкісні показники.

УДК 621.313.2

Аналіз перехідних процесів в вентильно-індукторні двигуни в режимі пуску // Л.П. Галайко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 36-39. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

В статті розглядається питання аналізу впливу закону зміни керуючих параметрів на характер перехідних процесів у режимі пуску вентильно-індукторного двигуна рудничного електровоза за допомогою розроблених моделей для програми Simulink пакета програм Matlab. Наведені результати розрахунків на цих моделях для двигуна потужністю 27 кВт та частотою обертів 1215 об/хв.

Ключові слова: вентильно-индукционный двигатель, переходные режимы работы, анализ, SIMULINK, режим пуска

УДК 621.315.2

Повышение точности при оценке компонент напряженности магнитного поля в стальной проволоке брони силового кабеля / И.А. Костюков // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 40-48. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

Із використанням поліноmu Чебишева отримані вирази для достатньо точної апроксимації розподілу радіальної та дотичної складових напруженості магнітного поля на поверхні сталевго доту брону силового кабелю. Збільшення точності тут досягається шляхом відповідного вибору вузлів інтерполяції.

Ключові слова: поліном Чебишева, радіальна та дотична складові напруженості магнітного поля, броня силового кабелю.

УДК 621.3.013

Моделювання розподілу однорідного статичного магнітного поля поблизу сталевго колони / Резинкіна М.М., Грінченко В.С., Кондусова Н.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 49-56. Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

У статті досліджено методи опису спотворення однорідного статичного магнітного поля поблизу витягнутого сфероїда, виконаного з однорідного ізотропного магнетика. Отримано аналітичні вирази для розподілу магнітного поля в такій системі. Показано, що отримані аналітичні вирази можуть бути використані для опису розподілу геомагнітного поля при наявності сталевго колони.

Ключові слова: аналітична модель, однорідне магнітне поле, витягнутий сфероїд, сталевга колона, COMSOL Multiphysics.

УДК 621.31:519.87:355.457(477)

Методика структурного синтезу підсистем утиліт систем електрозабезпечення технічних засобів охорони кордону / В. В. Левков // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Про-

блеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 57-65. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

Запропоновано методику визначення множини раціональних структур підсистем утиліт систем електрозабезпечення технічних засобів охорони кордону на основі використання потенціалу відновлюваних джерел енергії. Обґрунтовано, що кількісний та якісний склад структури підсистеми утиліт доцільно визначати за допомогою апарату алгебри логіки, шляхом використання формалізованих тотожностей логічних висловлювань.

Ключові слова: система електрозабезпечення, відновлювані джерела енергії, структурний синтез, утиліти, методика.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.318

Влияние температуры нагрева контактной системы вакуумного выключателя на статические напряжения в материале вакуумного сиффона / Е.И.Байда // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 3-7. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

В статье рассмотрено влияние температуры нагрева контактной системы на внутреннее напряжения в сиффоне вакуумного выключателя методом конечных элементов. Получена зависимость механических напряжений в материале в функции температуры при заданном ходе контактов. Показано, что наибольшие механические нагрузки испытывают места крепления сиффона к контактам и вакуумной камере. Значения механических напряжений в аварийных режимах работы могут превышать предел текучести при неправильно выбранном материале сиффона.

Ключевые слова: вакуумный сиффон, термомеханические напряжения.

УДК 621.315

Анализ микропроцессорного терминала шкафа управления обогревом туннелей метрополитена // Ю.С. Гришук, С.Л. Зуенко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 8-12. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведен анализ функций микропроцессорного терминала, рассмотрены особенности работы четырех аналоговых токовых входов и четырех аналоговых входов напряжения устройств 7SJ624 и 7SJ64. Изложены особенности дискретных входов и выходов последовательных интерфейсов. Рассмотрен отдельный сервисный интерфейс для учета данными с удаленным центром через персональный компьютер и последовательный системный интерфейс для работы с различными протоколами и передачи данных в центральную систему контроля и управления.

Ключевые слова: микропроцессорного терминала, шкаф управления, микроконтроллер.

УДК 621.3

Методика расчета индукторов индукционных кухонных плит // М.Г. Пантелют, Ю.В. Гурицков, А.В. Трофимов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 13-24. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

В статье предложена методика расчета индуктора – основного конструктивного элемента индукционной кухонной плиты. Представленная в настоящей работе методика разработана на основе инженерных методов расчета плоских индукторов промышлен-

ных индукционных нагревателей с учетом конструктивных особенностей и режимов работы индукционных кухонных плит. Выполнены расчеты индукторов применительно к ряду режимов нагрева посуды различных геометрических размеров. Проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: индукционная кухонная плита, индуктор, расчет.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Сравнение электромеханических показателей индукционно-динамического и электромагнитного двигателей / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – № 20 (1063). – С. 25-35. – Библиогр.: 20 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведено сравнение электромеханических показателей индукционно-динамического двигателя и электромагнитного двигателя, предназначенных для работы в качестве актуатора электрических коммутационных аппаратов. Для сравнения выбраны двигатели с одинаковыми массогабаритными параметрами при использовании емкостного накопителя энергии и электронной системы, формирующей апериодический импульс тока. Показаны преимущества индукционно-динамического двигателя по скоростным показателям по отношению к электромагнитному двигателю.

Ключевые слова: индукционно-динамический двигатель, электромагнитный двигатель, актуатор, скоростные показатели.

УДК 621.313.2

Анализ переходных процессов в вентильно-индукторном двигателе в режиме пуска // Л.П. Галайко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – № 20 (1063). – С. 36-39. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

В статье рассматривается вопрос анализа влияния закона изменения управляющих параметров на характер переходных процессов в режиме пуска в вентильно-индукторном двигателе рудничного электровоза с помощью разработанных моделей для программы Simulink пакета программ Matlab. Приведены результаты расчетов на этих моделях для двигателя мощностью 27 кВт и частотой вращения 1215 об/мин.

Ключевые слова: вентильно-индукционный двигатель, переходные режимы работы, анализ, SIMULINK, режим пуска.

УДК 621.315.2

Увеличение точности при оценке компонент напряженности магнитного поля в стальном проводе брони силового кабеля / И.О. Костиюков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 20 (1063). – С. 40-48. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

С применением полинома Чебышева получены выражения для достаточно точной аппроксимации распределения радиальной и тангенциальной составляющих напряженности магнитного поля на поверхности стальной проволоки брони силового кабеля. Повышение точности достигается путем соответствующего выбора узлов интерполяции.

Ключевые слова: полином Чебышева, радиальная и тангенциальная составляющие напряженности магнитного поля, броня силового кабеля.

УДК 621.3.013

Моделирование распределения однородного статического магнитного поля вблизи стальной колонны / Резинкина М.М., Гринченко В.С., Кондусова Н.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 49-56. Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

В статье исследованы методы описания искажения однородного статического магнитного поля в окрестности вытянутого сфероида, выполненного из однородного изотропного магнетика. Получены аналитические выражения для распределения магнитного поля в такой системе. Показано, что полученные аналитические выражения могут быть использованы для описания распределения геомагнитного поля при наличии стальной колонны.

Ключевые слова: аналитическая модель, однородное магнитное поле, сфероид, стальная колонна, COMSOL Multiphysics.

УДК 621.31:519.87:355.457(477)

Методика структурного синтеза подсистем утилит систем электроснабжения технических средств охраны границы / В.В. Левков // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 57-66. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-3944.

Предложена методика определения множества рациональных структур подсистем утилит систем электроснабжения технических средств охраны границы на основе использования потенциала возобновляемых источников энергии. Обосновано, что количественный и качественный состав подсистемы утилит целесообразно определять с помощью аппарата алгебры логики, путем использования формализованных тождеств логических высказываний.

Ключевые слова: система электроснабжения, возобновляемые источники энергии, структурный синтез, утилиты, методика.

ABSTRACTS

Influence of the vacuum switch contact system heating temperature on static mechanical stresses in the vacuum bellow material / E.I. Bajda // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems and Improvement elektrichesk machines and aids. Theory and Practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 3-7. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-3944.

The article considers the influence of the heating temperature of the contact system on the internal stresses in the bellows vacuum switch finite element method. Semi-Chen dependence of mechanical stresses in the material as a function of temperature during a given contact. Shown that the greatest mechanical load test the attachment of the bellows to the contacts and the vacuum chamber. Values of mechanical stress in emergency modes can exceed the yield strength in non-properly chosen material of the bellows.

Keywords: vacuum bellow, thermo-mechanical stresses.

Analysis of a microprocessor terminal of a control cabinet for underground railway tubes heating // Ju.S. Grischuk, S.L. Zuenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems and Improvement elektrichesk machines and aids. Theory and Practice. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 8-12. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-3944.

Analysis of the functions of the microprocessor of the terminal, the peculiarities of the four analog current inputs and four analog input voltage devices 7SJ624 and 7SJ64. Outlined the features of digital inputs and outputs serial interfaces. Considered a separate service inter-

face to record data with a remote control center via a personal computer and a serial system interface for various protocols and data transfer to a central monitoring and control system.

Keywords: microprocessor terminal, control cabinet, microcontroller.

A technique for induction cookers' inductors calculation // M.G. Pantelyat, Ju.V. Gurentsov, A.V. Trofimov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 13-24. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-3944.

In the paper a technique for the calculation of inductor – main structural part of an induction cooker is proposed. The presented technique is developed on the base of engineering methods for calculation of industrial induction heaters' planar inductors taking into account structural peculiarities and operation modes of induction cookers. Calculations of inductors regarding a number of heating modes for kitchen utensils of various sizes are carried out. Geometrical, electrical and power quantities such as outer and inner diameters of inductors, their thickness and number of turns, magnetic field strength on the utensils' surface, current in the inductor, electrical efficiency, etc. are calculated. Obtained results are analyzed.

Keywords: induction cooker, inductor, calculation.

Comparison of electromechanical parameters of an induction-dynamic motor and an electromagnetic motor / V.F. Bolyukh, S.V. Oleksenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 25-35. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2079-3944.

Comparison of electromechanical indicators of an induction-dynamic motor and an electromagnetic motor, designed to work as an actuator of electrical switchgears is carried out. Motors with the same weight and size parameters using capacitive energy storage and electronic systems forming an aperiodic current pulse are selected for comparison. The advantages of the induction-dynamic motor by speed values in relation to the electromagnetic motor are shown.

Keywords: induction-dynamic motor, electromagnetic motor, actuator, speed values.

An analysis of transient modes of a switch reluctance motor at operation in regime of starting / L.P. Galayko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 36-39. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-3944.

The question of analysis of influence of law of change of control parameters on the character of transients in the mode of starting of a Switched Reluctance Motor of a miner electric locomotive by means of models developed for the Simulink program of the software program Matlab is considered. Results of calculations by these models for a motor of power of 27 kW and frequency of rotation 1215 rev/ min are presented.

Keywords: switched reluctance motor, transient modes of operation, analysis, SIMULINK, regime of starting.

Increasing of precision of components of magnetic field determination in steel armour of power cable is obtained / I.A. Kostykov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 40-48. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-3944.

By using Chebyshev polynomials approximate expressions for determination of radial and tangential components of magnetic field intensity on the surface of power cable steel armour are obtained. The increase of precision is obtained by choosing appropriate nodes of approximation. Obtained expressions for radial and tangential components are sufficiently

correct for determination of behavior of mentioned components on the surface of of power cable armour.

Keywords: Chebyshev polynomials, radial and tangential components of magnetic field intensity, power cable armour.

Modeling of uniform static magnetic distribution near steel column / Rezinkina M.M., Grinchenko V.S., Kondusova N.V. // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 49-56. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-3944.

The article deals with the methods for describing the distortion of homogeneous static magnetic field induced by homogeneous isotropic magnet spheroid. The obtained analytical expressions describe the distribution of the magnetic field in such system. It is shown that these analytical expressions can be used to describe the distortion of the geomagnetic field in the presence of a steel column.

Keywords: analytical model, uniform magnetic field, prolate spheroid, steel column, COMSOL Multiphysics.

A technique for structural analysis of subsystems of utilities for power supply systems of technical means for frontiers protection / V.V. Levkov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems and Improvement elektricheski machines and aids. Theory and Practice. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 57-65. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-3944.

A technique for determining the set of rational structures of subsystems of utilities for power supply systems of technical means for frontiers protection on the base of renewable energy potential is proposed. It is substantiated that the qualitative and quantitative composition of subsystem of utilities can usefully be determined using the apparatus of the algebra of logic by use of formal identities of logical statements. The technique can be used to produce a variety of alternative sets of tools in the future will provide a scientific-methodological apparatus to generate optimal structures of power supply systems technical security boundary.

Keywords: power system, renewable energy, structural synthesis, utilities, technique.

ВИМОГИ

до оформлення статей у Віснику Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика»

Стаття направляється у редакцію у друкованій формі (1 примірник) та в електронній формі електронною поштою або на диску.

Стаття у друкованій формі направляється у редакцію як додаток до супроводного листа від автора статті або від керівника установи, в якій працює автор статті, на ім'я відповідального редактора серії Вісника. У листі зазначається, що стаття є оригінальною, написана авторами особисто, не містить інформації, забороненої до публікації у відкритому друці, не містять даних про неоформлені винаходи авторів або інших осіб. В листі також вказується науковий напрям (рубрика) серії Вісника, до якого має бути віднесено статтю, а також перераховуються додатки, а саме – стаття; дані про авторів; копія документу про оплату за публікацію.

Наукові напрями (рубрики) серії Вісника:

- електричні апарати;
- електричні машини;
- теоретичні основи електротехніки;
- сильні електричні та магнітні поля;
- електричні станції і мережі;
- комп'ютерне моделювання;
- використання електротехнологій;
- пристрої та методи неруйнівного контролю;
- електричний транспорт;
- інформація, гіпотези, думки.

Дані про авторів (мовою статті) мають містити: прізвище, ім'я, по батькові повністю, повну назву організації (установи) кожного з авторів, посаду, поштову адресу, телефон (бажано мобільний), e-mail.

Супроводний лист з додатками відправляють за адресою:

Кафедра «Електричні апарати», НТУ «ХПІ», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна.

Оплата публікації **15 грн.** за одну сторінку формату **A5**.

Р/р 26008000074734 (UAH) в ПАТ "Укрсоцбанк", МФО 300023, код ЄРДПОУ 26450114, НТУ "ХПІ", ГО "Асоціація випускників НТУ "ХПІ" (з позначкою: "SIEMA").

Електронний варіант відправляють електронною поштою за адресою: **varshamova_i@rambler.ru**. Також статтю можна завантажити, попередньо зареєструвавшись, за адресою: <http://journals.uran.ua>.

Довідки за телефонами:

+380974604277 – відповідальний секретар Варшамова Ірина Сергіївна,
+380667353882 – секретар Себякіна Наталія Валентинівна.

Правила оформлення статей

Стаття повинна бути виконана з використанням редактора **Microsoft Word** без нумерації сторінок. Обсяг статті – не менше 4 сторінок, не враховуючи бібліографічний опис. Переноси допускаються лише «м'які» (клавіша

Ctrl+«-»). Звичайні та автоматичні переноси заборонені.

Розмір паперу: А5; орієнтація – книжна; поля: низ – 2,5 см, інші по 2 см. Інтервал між рядками по всій статті – одинарний, шрифт **Times New Roman** (для текстів комп'ютерних програм – шрифт Arial або Courier), розмір (там, де не зазначено інакше) – 10 пт, звичайний.

Стаття містить:

1 **Код УДК**. Друкується без відступу, вирівнювання по лівому краю.

2 **Ініціали і прізвища авторів** (для кожного автора – з нового рядка). Друкуються через один порожній рядок після УДК. Вирівнювання по лівому краю, відступ 0,75 см. Ініціали й прізвища пишуться великими літерами; шрифт курсив напівжирний.

Слідом за прізвищем через кому вказується наукова ступінь (канд. техн. наук; д-р фіз.-мат. наук; академік та ін.), посада (студент, асп., наук. співр., доц., проф.), назва організації (НТУ «ХПІ»; ІПМаш НАН України, Харків; ЗАТ ННГідропривод, Харків; БелГАСМ, Белгород, Росія). Шрифт звичайний. Дані на кожного автора закінчуються знаком «;». Назву міста не треба вказувати для НТУ «ХПІ» або якщо вона міститься у назві організації (Сумське НВО ім. Фрунзе). Назва держави вказується тільки для іноземних авторів. Кожне прізвище пишеться з нового рядка.

3 **Назва статті**. Друкується великими літерами через один порожній рядок після інформації про авторів. Шрифт – прямий, напівжирний; відступ 0,75 см; відступ першого рядка 0 см; вирівнювання по лівому краю.

4 У статті повинна бути анотація зі списком ключових слів, написана мовою, якою написана стаття (українською або російською) через один порожній рядок після назви статті. Після списку літератури і дати надходження статті надаються дві інші анотації, перед кожною з яких наводиться бібліографічний опис публікації.

У анотаціях (насамперед в англomовній) необхідно стисло навести результати роботи, що включають вступ, мету і завдання статті, методи розв'язання, отримані результати, висновок (у явному або неявному вигляді). Обсяг **української або російської** анотації повинен складати **50-60 слів**, обсяг **англomовної** анотації – **100-250 слів**.

Анотації повинні бути:

- інформативними (не містити загальних, нічого не значущих слів);
- змістовними (відображати основний зміст статті і результати дослідження);
- структурованими (не аморфними);
- компактними;
- англomовна анотація повинна бути написана **якісною** англійською мовою.

Анотація оформлюється шрифтом 8 пт; без відступу; вирівнювання по ширині. Абзацний відступ першого рядка **0** (у анотації, що йде за назвою статті) і **0,75** (у анотаціях, що йдуть у бібліографічному описі).

Після кожної з анотацій відповідною мовою з нового рядка (відступ першого рядка 0,75 см) тим же шрифтом друкуються **ключові слова** кількістю 5-

10 слів (див. *Приклад оформлення статті*). Після кожного зі списку ключових слів вставляється порожній рядок.

На окремій сторінці надаються бібліографічні описи.

Перший бібліографічний опис статті повинен містити код УДК і дається українською мовою з друкуванням назви статті та ініціалів і прізвищ авторів **мовою, якою написана стаття**. Шрифт – 8 пт.

Далі надається анотація і **ключові слова** українською мовою.

Далі через один порожній рядок дається **другий бібліографічний опис** (йому повинен передувати код УДК) з перекладом назви статті та прізвищ й ініціалів авторів **на російську мову**. Відомості про видання, починаючи з назви збірника наводяться **українською мовою**. Назва місця видання (Харків) повністю.

Далі надаються анотація і ключові слова **російською мовою**.

Третій бібліографічний опис наводиться **англійською мовою** через один порожній рядок. Слідом йдуть анотація і **ключові слова** англійською мовою.

Структуру бібліографічних описів і їх оформлення – див. *Приклад оформлення статті*.

5 Основний текст починається через один порожній рядок після назви статті. Шрифт – 10 пт.

Вирівнювання виконується по ширині, відступ нового рядка – 0,75 см.

Текст повинен містити підрозділи: вступ, аналіз останніх досліджень та літератури, мету статті, постановку проблеми, матеріали досліджень, результати досліджень, висновки. Висновки мають відображати перспективи подальших досліджень у цьому напрямку.

Назви підрозділів друкуються жирним шрифтом з відступом 0,75 см.

Посилання в тексті на рисунки і таблиці мають вигляд: див. рис. 1, а; у табл. 2.

Посилання на літературу даються у квадратних дужках, наприклад, у [3], у [14, 16], або [11, с. 5].

Посилання на формули мають вигляд: у рівнянні (4); дивись формули (5)-(7), або формули (5)...(7).

Формули створюються у вигляді об'єктів редактором формул MS Equation, центруються.

Нумерація, якщо вона необхідна, ставиться праворуч у дужках з притискуванням номерів до правого поля.

Невеликі формули можна розміщати не в окремому рядку, а безпосередньо в тексті. Після формул потрібно ставити розділові знаки, якщо цього вимагає синтаксис; одна від іншої формули відокремлюються точкою з комою.

Якщо формула міститься у середині речення, то продовження речення у наступному за формулою рядку не повинне мати відступ.

Не рекомендується використовувати в редакторі формул літери кирилиці.

Нескладні формули можна набирати в Word без використання редактора формул, наприклад: $R = \beta \cdot r; a^2 + b_1/c$. Розміри шрифту в MS Equation слід встановлювати такі: звичайний – 10 пт, великий індекс – 6 пт, малий – 5 пт,

великий символ – 15 пт, малий – 10 пт. У тексті рекомендується використовувати тире середньої довжини (клавіша «Ctrl + Gray–»).

Шрифти: Times New Roman і Symbol, стиль прямий або курсив.

Латинські літери набирати курсивом, прямим шрифтом – функції ($\sin$, $\lg$ та ін.), числа подібності (Bi, Pr та ін.), математичні скорочення ($\max$, $\lim$, $\exp$ та ін.), хімічні формули (Cl, H_2O та ін.). Вектори та матриці набирати напівжирним шрифтом.

Прямим шрифтом набирати у формулах літери кирилиці, одиниці вимірювання (МПа, кДж/м² та ін.) Не можна застосовувати у тексті знаки (+, >, =, №, %, 0, °C, Ø [діаметр], $\sin$ та ін.) окремо без числових або літерних значень.

Літери грецького алфавіту рекомендується набирати прямим шрифтом.

Рисунок повинен бути оформлений як окремий об'єкт у тексті статті, розташування поверх тексту не допускається; рисунок відокремлюється від тексту зверху і знизу порожнім рядком. Рекомендується використовувати чорно-білу палітру – якість відтворення рисунків кольорової палітри не гарантується. Для растрових рисунків шириною на всю сторінку рекомендована кількість пікселів по горизонталі від 1000 до 3000.

Символи на рисунку повинні бути близькими за розміром до основного тексту. Частини рисунку позначаються під рисунком літерами *a*, *b*, ... без дужки. У цьому разі у підписувальних підписах подаються пояснення, що стосуються частин рисунку (див. *Приклад оформлення статті*).

Написи на рисунку, позначення елементів на ньому (1, 2, 3) пишуть курсивом.

Посилання у тексті та у підписувальних підписах на частини рисунків (див. рис. 1, *a*, *b*) і на його елементи (1, 2, 3) подаються курсивом.

Усі рисунки (навіть якщо у статті тільки один рисунок) **нумеруються** в підписувальних підписах (Рисунок 1 – ... або Рис. 1 –...). Слідом за номером рисунку після тире подається його назва (з великої літери). Підписувальний підпис виконується шрифтом у 9 пт на відстані одного рядка від рисунка з центруванням; міжрядковий інтервал – одинарний, наприклад:

Рис. 1 – Коефіцієнти послаблення електричної складової: *a* – для внутрішніх поверхонь, *b* – для зовнішніх поверхонь

Розрізняти дефіс від тире. Тире з обох сторін відокремлюються пробілами (**крім зазначення діапазону**).

Таблиця відокремлюється від тексту зверху і знизу порожнім рядком; використовується шрифт – 9 пт. **Усі таблиці нумеруються** (навіть якщо стаття містить тільки одну таблицю).

Заголовок таблиці містить номер таблиці та назву і може бути оформлений у вигляді складової частини таблиці з невидимою сіткою.

Заголовок має вигляд: Таблиця 1 – (назва); Продовження таблиці 1; Завешення таблиці 1.

Заголовок вирівнюється по центру без відступів; Назва таблиці ставиться після тире, наприклад:

Таблиця 1 - Визначення експериментальних втрат у відсмоктуючій трубі

Список літератури подається через один порожній рядок після основного тексту статті.

Розмір шрифту – 8 пт; без відступу; вирівнювання по ширині. Він починається з набраних напівжирним шрифтом слів **Список літератури:**, слідом за якими ставиться двокрапка.

Сам список літератури набирається суцільним текстом з виділенням прізвищ й ініціалів авторів курсивом; номер позиції виділяється жирним шрифтом і не повинен відриватися від подальшого тексту (замість пробілу треба використовувати "нерозривний пробіл" – клавіша "Ctrl + Shift + Space"). При оформленні списку літератури потрібно дотримуватися вимог ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 і ВАК України. Приклад оформлення списку літератури див. *Приклад оформлення статті*.

Якщо авторів більше трьох, то після прізвищ перших трьох авторів можна вказувати: [та ін.], [и др.], [at all].

Ініціали і прізвище не повинні бути у різних рядках, їх можна з'єднати «нерозривним пробілом» (клавіша «Ctrl + Shift + Space»).

Розділові знаки в списку літератури – відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 і ВАК України.

Розділові знаки «:», «;», «–», «/» та «//» відокремлюються від тексту пробілами як зліва, так і справа; знаки «.», «.» не відокремлюються від тексту пробілом зліва.

Безпосередньо після списку літератури має бути приведений його другий варіант у транслітеральному запису латиницею, орієнтований на стиль MLA. Для отримання транслітерального запису кирилических текстів можуть бути використані автоматичні конвертори <http://translit.kh.ua/> ([Українська транслітерація – онлайн конвертор](#)) для текстів українською мовою або <http://translit.ru/> ([Транслит по-руски](#)) для текстів російською або українською. Якщо в описі літературного джерела є складові частини, записані різними мовами (наприклад, автори та назва статті російською мовою у виданні українською мовою), то ці частини конвертуються окремо. Літературні джерела, видані мовами, алфавіти яких базуються на латиниці, описувати мовою-оригіналом з використанням стилю MLA.

Особливості стилю MLA і приклади опису джерел інформації з його використанням див. за адресою <http://www.nbuv.gov.ua/node/930>.

Після транслітерального списку літератури в наступному рядку вказується дата надходження статті до редколегії. Після слів «*Надійшла (received)*» або «*Поступила (received)*» (залежно від мови, якою написана стаття) ставиться число, місяць і рік через крапку у форматі 00.00.0000. Розмір шрифту – 8 пт; курсив; вирівнювання по правому краю.

Приклад оформлення наведено на наступних сторінках.

В.Ф. БОЛЮХ, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ", Харків
С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспірант, НТУ "ХПІ", Харків

ПОРІВНЯННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ІНДУКТИВНО-ДИНАМІЧНОГО І ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ДВИГУНІВ

Проведено порівняння електромеханічних показників індукційно-динамічного двигуна та електромагнітного двигуна. Показано переваги індукційно-динамічного двигуна за швидкісними показниками по відношенню до електромагнітного двигуна.

Ключові слова: індукційно-динамічний двигун, електромагнітний двигатель, актуатор, швидкісні показники.

Вступ. Індукційно-динамічні (ІДД) і електромагнітні двигуни (ЕМД) широко використовуються в промислових

Продовження тексту статті (з обов'язковим виділенням розділів) ...

Формула, (3)

де x – пояснення 1 (звичайна змінна – латинія); y – пояснення 2 (вектор – латинія); A – пояснення 3 (матриця – латинія); ε – пояснення 4 (змінна – грецька літера).

Продовження тексту статті

На рис. 1, *a–б*, представлено Як це видно з рис. 1, *a*, очікувалося У той же час (див. рис. 1, *б*).

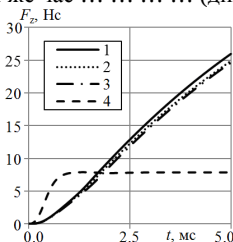


Рис. 1 – Изменение импульса силы F_z ИДД и ЭМД в течении рабочего цикла

Продовження тексту статті

У табл. 1 наведено дані

Таблица 1 – Дані експерименту

XXX	XXXXXXX			
	XXX	XXX	XXX	XXX
xxxxxxxx	xxxxx	xxxxx	xxxxx	xxxxx

Висновки. Отримані результати підтверджують

Список литературы: 1. Афонин А.А., Гребеников В.В. Электродинамические системы повышенного быстродействия // Техническая электродинамика. – 1994. – № 5. – С. 23-29. 2. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 37-43. 3. Балковой А.П., Костин А.В., Мягих А.С. и др. Особенности проектирования гаммы прямых линейных электроприводов для машиностроения // Электротехника. – 2013. – № 7. – С.13-20. 4. Cho D.J., Woo D.K., Ro J.S. et al. Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter-locking mechanism for a magnetic switch // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – Vol. 49, №5 – P. 2229-2232. 5. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48, №11. – P. 3315-3318.

Bibliography (transliterated): 1. Afonin A.A., Grebenikov V.V. Electrodynamic systems improved performance // Technical electrodynamics. – 1994. – № 5. – P. 23-29. 2. Ugarov G.G., Neumann V.Y. Trends in the development and application of hand shock machines with electromechanical energy conversion // Proceedings of Higher Education. Electromechanics. – 2002. – № 2. – P. 37-43. 3. Balkovoj A.P., Kostin A.V., Mjagkih A.S. etc. // Design features range direct linear actuators for engineering // Electrical Engineering. – 2013. – № 7. – P. 13-20. 4. Cho D.J., Woo D.K., Ro J.S. et al. Novel electromagnetic actuator using a permanent magnet and an inter-locking mechanism for a magnetic switch // IEEE Transactions on Magnetics. – 2013. – Vol. 49, №5 – P. 2229-2232. 5. Bissal A., Magnusson J., Engdahl G. Comparison of two ultra-fast actuator concept // IEEE Transactions on Magnetics. – 2012. – Vol. 48, №11. – P. 3315-3318.

Поступила (received) 29.04.2014



Болох Владимир Федорович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.

НА ОКРЕМІЙ СТОРІНЦІ

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Порівняння електромеханічних показників індукційно-динамічного та електромагнітного двигунів / В.Ф. Болох // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 20 (1063). – С. 25-35. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведено порівняння електромеханічних показників індукційно-динамічного двигуна та електромагнітного двигуна..... Показні переваги індукційно-динамічного двигуна за швидкісними показниками по відношенню до електромагнітного двигуна.

Ключові слова: індукційно-динамічний двигун, електромагнітний двигун, актуатор, швидкісні показники.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Сравнение электромеханических показателей индукционно-динамического и электромагнитного двигателей / В.Ф. Болюх // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Х.: НТУ «ХПИ», 2014. – № 20 (1063). – С. 25-35. – Библиогр.: 20 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведено сравнение электромеханических показателей индукционно-динамического двигателя и электромагнитного двигателя..... Показаны преимущества индукционно-динамического двигателя по скоростным показателям по отношению к электромагнитному двигателю.

Ключевые слова: индукционно-динамический двигатель, электромагнитный двигатель, актуатор, скоростные показатели.

Comparison of electromechanical parameters of an induction-dynamic motor and an electromagnetic motor / V.F. Bolyukh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 20 (1063). – P. 25-35. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2079-3944.

Comparison of electromechanical indicators of an induction-dynamic motor and an electromagnetic motor..... The advantages of the induction-dynamic motor by speed values in relation to the electromagnetic motor are shown.

Keywords: induction-dynamic motor, electromagnetic motor, actuator, speed values.

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

БАЙДА Е.И.

Влияние температуры нагрева контактной системы вакуумного выключателя на статические напряжения в материале вакуумного сильфона3

ГРИЩУК Ю.С., ЗУЄНКО С.Л.

Аналіз мікропроцесорного терміналу шафи керування обігрівом тунелів метрополітену8

ПАНТЕЛЯТ М.Г., ГУРЕНЦОВ Ю.В., ТРОФІМОВ А.В.

Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит13

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

БОЛЮХ В.Ф., ОЛЕКСЕНКО С.В.

Сравнение электромеханических показателей индукционно-динамического и электромагнитного двигателей..... 25

ГАЛАЙКО Л.П.

Анализ переходных процессов в вентильно-индукторном двигателе в режиме пуска36

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

КОСТЮКОВ И.А.

Повышение точности при оценке компонент напряженности магнитного поля в стальной проволоке брони силового кабеля.....40

РЕЗИНКИНА М.М., ГРИНЧЕНКО В.С., КОНДУСОВА Н.В.

Моделирование распределения однородного статического магнитного поля в окрестности стальной колонны49

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

ЛЕВКОВ В.В.

Методика структурного синтезу підсистем утиліт систем електрозабезпечення технічних засобів охорони кордону57

РЕФЕРАТИ.....66

РЕФЕРАТЫ.....67

ABSTRACTS.....69

Вимоги до оформлення статей72

Наукове видання

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія

**Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.
Теорія і практика**

№ 20 (1063) 2014

Відповідальний редактор д.т.н., проф. *Б.В. Клименко*

Технічний редактор: *Н.В. Себякіна*

Відповідальний за випуск к.т.н. *І.Б. Обухова*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21. НТУ "ХПІ"

Кафедра "Електричні апарати". Тел. (057) 707-69-76

E-mail: varshamova_i@rambler.ru

Обл.-вид. № 75-14

Підп. до друку 27.06.2014 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. Riso-друк.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5. Наклад 300 прим., 1-й з-д 1-80.

Зам. № 100. Ціна договірна.

Видавець і виконавець
Видавничий центр НТУ "ХПІ",
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.