

УДК 621.3. 011

О. І. БОНДАР – к. т. н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, olbond36@mail.ru

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В УСТАНОВЦІ РОЗМАГНІЧУВАННЯ ФЕРОМАГНІТНИХ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ФОРМИ

### Постановка проблеми та аналіз публікацій

При проектуванні та аналізі роботи різноманітних електротехнічних пристроїв досить часто постає задача розрахунку електромагнітних полів у великогабаритних феромагнітних провідниках циліндричної форми. Можливо виділити три основні напрямки розв'язання цієї задачі. Перший з них полягає у фізичних моделях установок зменшених габаритів на основі теорії подібності. Питання фізичного моделювання постійних та змінних магнітних полів та особливості різних моделюючих пристроїв докладно описано в [1]. Результати експериментальних досліджень намагнічування феромагнітного циліндра наведено також у більш сучасній роботі [2]. Іншим напрямком є математичне моделювання процесів у зазначених системах. Зокрема, в роботі [3] запропоновано методичку чисельного розрахунку магнітного стану суцільного феромагнітного стрижня кругового перерізу, що знаходиться у постійному магнітному полі шляхом застосування методу просторових інтегральних рівнянь. Третім окремим напрямком у моделюванні електромагнітних процесів у вказаних системах є комп'ютерне моделювання на основі спеціалізованого програмного забезпечення. Так, наприклад, у роботі [3] вирішено задачу комп'ютерного моделювання електромагнітного поля асинхронного двигуна із зовнішнім великогабаритним ротором у станичних та динамічних режимах роботи за допомогою пакета програм Maxwell.

Ця стаття продовжує раніше згаданий напрямок математичного моделювання

процесів в установках намагнічування великогабаритних феромагнітних циліндрів. Таке моделювання має передусім визначення ефективних параметрів кола намагнічування або розмагнічування матеріалу, а також вирішення питання забезпечення електромагнітної сумісності установки при обраних параметрах.

### Обґрунтування результатів

Отже, в даній роботі досліджуються електричні та магнітні величини у системі, зображеній на рис. 1. Циліндр 1, на відміну від робіт [2] та [3] в загальному випадку – багатошаровий. З торців його замкнено шихтованим магнітопроводом 2 великого перерізу. Поле утворюється струмом, який протікає через обмотку 3. Гістерезис феромагнітних шарів враховується.

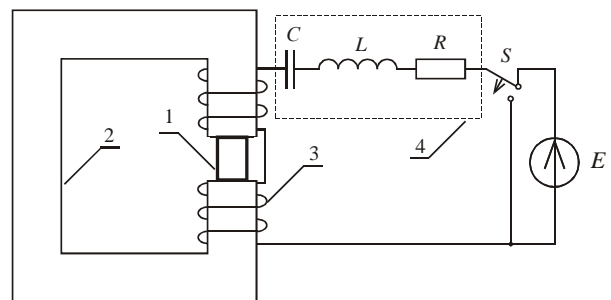


Рис. 1. Електрична принципова схема пристрою намагнічування й розмагнічування матеріалів

Система рівнянь Максвела для квазістационарного стану електромагнітного поля має вигляд

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \gamma \vec{E}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (2)$$

Якщо сумістити вісь  $z$  циліндричної системи координат  $(\rho, \phi, z)$  з віссю симетрії циліндра, тоді з умови припущень про те, що поле є плоским та паралельним а також симетричним відносно вісі  $z$ , вектори напруженостей  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ , та магнітної індукції  $\vec{B}$  залежать лише від однієї просторової координати – відстані  $\rho$  від вісі циліндра. Електромагнітне поле у цьому випадку описують системою двох одномірних скалярних рівнянь у частинних похідних.

$$\frac{\partial H}{\partial \rho} = -\gamma E, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho E) = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4)$$

$$r_0 \leq \rho \leq re. \quad (5)$$

В якості прикладу, на рис. 2 наведено результати чисельного розрахунку за допомогою стандартних процедур програмного пакета Maple. Ці розрахунки відповідають процесу розмагнічування циліндра 1 з матеріалу ЮНДК24Б радіусом 10 мм на контур 4 (див. рис. 1) за таких його параметрів  $R = 0,4 \text{ Ом}$ ,  $L = 4,56 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$ ,  $C = 220 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}$ . Граничні умови у цьому разі витікають із співвідношення за другим законом Кірхгофа для кола розряду

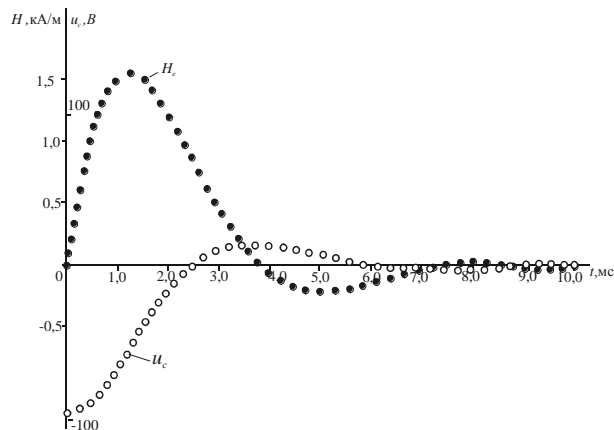


Рис. 2. Часові залежності напруженості магнітного поля на поверхні циліндра та напруга на ємності протягом процесу розмагнічування зразка

$$L \frac{di}{dt} + Ri + u_c(t) + w \frac{d\Phi_e}{dt} = 0, \quad (6)$$

де

$$u_c(t) = u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt. \quad (7)$$

## Висновки

За результатами виконаної роботи можна зробити наступні висновки.

1. Наявність у колі ємності при обраній раціональній комбінації параметрів призводить до періодично згасаючого коливального перехідного процесу під час розмагнічування циліндричного зразка. Тривалість процесу розмагнічування при даних параметрах – 10 мс.

2. При розв'язуванні задач із урахуванням явища гістерезису слід мати на увазі, що запропонована модель гарантує правильність розрахунків, якщо параметри кола забезпечують монотонність зміни напруженості поля від позитивного до негативного максимумів та вихід на граничну петлю гістерезису протягом процесу перемагнічування матеріалів.

3. На нашу думку, при наукових дослідженнях електромагнітних процесів у системах класу «електричне коло – електромагнітне поле» перевагу слід віддати математичному моделюванню на основі класичної теорії електромагнітного поля у поєднанні з чисельними методами розрахунку відповідних рівнянь. У той же час при проектуванні конкретних електротехнічних пристроїв більш ефективним є комп'ютерне моделювання, хоча у більшості випадків при його застосуванні дослідник не має повної інформації про структуру моделі, яку використовує. Фізичне моделювання також є актуальним, оскільки дозволяє підтвердити адекватність прийнятих припущень при побудові математичних або комп'ютерних моделей зазначених систем.

4. Подальших досліджень потребує питання забезпечення електромагнітної сумісності установок намагнічування та роз-

магнічування речовин при обраних раціональних, з точки зору основних процесів, параметрах установки.

### Бібліографічний список

1. Демирчян, К. С. Моделирование магнитных полей [Текст]: / К. С. Демирчян. – Л.: Энергия, 1974. – 288 с.
2. Бондар, О. І. Фізичне моделювання електромагнітних процесів в установці імпульсного намагнічування [Текст] / О. І. Бондар // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2014. – Ном. 8. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2014. – С. С.38-39.
3. Моделирование магнитного состояния ферромагнитного стержня в продольном постоянном магнитном поле [Текст] / В.Ф. Матюк и др. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 1. – С. 20-27.
4. Плюгин, В. Е. Численное моделирование электромагнитного поля асинхронного двигателя с внешним массивным ротором [Текст] / В. Е. Плюгин. // Вісник НТУ

«ХПП». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПП», 2013. – № 51 (1024). – С. 66-75.

**Ключові слова:** математичне моделювання, електромагнітні процеси, розмагнічування, чисельний розв'язок.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, электромагнитные процессы, размагничивание численное решение.

**Keywords:** mathematical simulation, electromagnetic processes, demagnetization, numerical solution.

### Рецензенти:

д.т.н., проф. А. Б. Бойнік,  
д.т.н., проф. А. М. Муха.

Надійшла до редколегії 09.03.2017.

Прийнята до друку 20.03.2017.