

УДК 539.1

ПРО ПОВНУ СИСТЕМУ ВИХІДНИХ СПІВВІДНОШЕНЬ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ ФІЗИЧНИХ СИСТЕМ З ПАМ'ЯТТЮ

Ю.Л. МЕНТКОВСЬКИЙ, В.П. ХОЛОД

Київський національний університет технологій та дизайну

Показано, що в межах феноменологічної електродинаміки суцільних середовищ до цього часу не побудовано замкнену систему еволюційних співвідношень, які описують розгортання фізичних процесів у часі у разі значних спадкових ефектів, тобто за наявності гістерезисних явищ. Зазначено можливі шляхи побудови повної системи еволюційних співвідношень

Є всі підстави стверджувати, що природним рівнем прив'язки всіх фундаментальних фізичних теорій є макрофеноменологія, основні закони якої допускають пряму експериментальну перевірку, чого не можна сказати про мікро- та про мегафізику. Справді, адекватність мікротеорій, що звичайно насичені різноманітними припущеннями, прийнятими мікромоделями та наближеннями, перевіряється відповідністю наслідків з них до макрозакonomірностей, які можуть бути безпосередньо перевірені дослідним шляхом. Як наслідок цього, фундаментом фізики в цілому є макрофеноменологія, відштовхуючись від якої фізика заглиблюється і розширюється в мікро- та мегасвіт. А тому саме макрофеноменологія і підлягає в першу чергу постановці на максимально строго логічну основу. Критеріями строгості в різних науках є або замкнена система аксіом (математика), або повна система постулатів (фізика), або сукупність первинних положень (макробіологія). Аксіоми та постулати визначають обмеження, в яких діють закони і за які, зрозуміло, не можуть виходити прикладні науки. У цьому полягає велике практичне значення теорій.

Проте в класичній фізиці є особливі розділи – фізики суцільного середовища, вихідні положення яких разом із фундаментальними постулатами включають в себе також модельні співвідношення як наслідок модельності самої концепції суцільності. Такі співвідношення звичайно не є універсальними, а тому можуть бути різними для конкретних фізичних задач.

Тим не менш, добре відпрацьовані модельні співвідношення, що перебувають у відповідності до експериментальних даних для певного класу задач, мають значення, аналогічне постулатам, і тому спроможні їх замінювати.

Об'єкти та методи дослідження

Об'єктами дослідження є системи з гістерезисом, до яких, зокрема, належать відносяться феромагнетики та сегнетоелектрики, а також будь-які матеріали, що виявляють запізнювання реакції на зовнішні впливи.

В електродинаміці фізичних систем з пам'яттю, що тут розглядається, фундаментальною системою постулатів є рівняння Максвелла. Матеріальні співвідношення, що їх доповнюють, мають звичайно модельний характер. Для систем, які виявляють суттєві спадкові ефекти, такі модельні співвідношення до цього часу не побудовано.

Постановка завдання

Метою статті є показати необхідність побудови замкненої системи еволюційних співвідношень електродинаміки суцільного середовища.

Результати та їх обговорення

Про повну систему вихідних співвідношень електродинаміки суцільного середовища.

Фундаментальні рівняння Максвелла, як відомо, мають такий вигляд (у системі СІ та стандартних позначеннях):

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}; \quad \operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}; \quad \operatorname{div}\vec{D} = \rho; \quad \operatorname{div}\vec{B} = 0. \quad (1)$$

Система (1) є неповною, її необхідно доповнити матеріальними співвідношеннями, що будуть відрізнятися для різних фізичних систем. Почнемо з прикладу системи, для якої ефектами запізнювання можна знехтувати. Замкнена система вихідних співвідношень для таких систем дає можливість дати відповіді на будь-які питання теорії і практики.

А. Приклад системи з повним набором вихідних еволюційних співвідношень

У векторному варіанті матеріальні співвідношення, що доповнюють систему (1) для однорідних, ізотропних систем, які не виявляють спадкових ефектів, мають такий вигляд:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}; \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (2)$$

де ε , μ , σ – константи матеріалу.

Сукупність еволюційних співвідношень (1), (2) дозволяє визначити всі шукані величини $\vec{D}, \vec{E}, \vec{B}, \vec{H}, \vec{j}$ як функції часу, якщо задані константи матеріалу ε , μ , σ та просторовий розподіл вільних зарядів $\rho = \rho(\vec{r}, t)$, тобто маємо можливість відповідати на всі питання теорії і практики.

Б. Приклад системи з неповним набором вихідних еволюційних співвідношень

У загальному випадку система матеріальних співвідношень для тіл, що поляризуються та намагнічуються, має такий вигляд:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \{ \vec{E} + \vec{P} \}; \quad \vec{B} = \mu_0 \{ \vec{H} + \vec{J} \}; \quad \vec{j} = \sigma \{ \vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}] \}. \quad (3)$$

де $\vec{P}(t)$ і $\vec{J}(t)$ – поляризованість та намагніченість відповідно, \vec{v} – дрейфова швидкість носіїв струму провідності.

Для систем з гістерезисом будь-яких феноменологічних моделей еволюційного типу для $\vec{P}(t)$ і $\vec{J}(t)$ не існує, а тому сукупність співвідношень (1), (3) не дозволяє визначити еволюцію в часі всіх невідомих функцій, що до неї входять. Для практичних розрахунків до цього часу використовують апроксимацію експериментальних даних (спадаючої та висхідної частин петлі гістерезису) кусково-неперервними функціями (див. наприклад, [1]). Не дає конструктивного підходу для фізики та прикладних наук також і математична теорія «гістеронів», де основна увага приділена доведенню загальних математичних теорем, у тому числі щодо неоднозначних функцій [2].

Автори мають підстави вважати, що їм все ж таки вдалося на базі спадкових визначальних співвідношень Больцмана–Пікара–Вольтерри побудувати конструктивний метод вирішення зазначеної вище проблеми [5]. Маємо також надію, що розвиток цього феноменологічного методу є перспективним, оскільки він:

– ґрунтується в цілому на фізичних принципах і моделях процесів, що відбуваються в сегнетоелектриках і ферромагнетиках у зовнішньому електромагнітному полі;

- адекватно відтворює петлю гістерезису як функцію часу, причому неоднозначність цієї функції виникає як наслідок напряму процесу і запізнення реакції системи;
- узгоджується з експериментальними даними щодо тенденцій зміни петлі залежно від швидкості (або частоти) зміни поля.

Стисло розглянемо тут досить загальний приклад таких інтегральних співвідношень, які побудовані в працях [3,4], а докладніше в праці [5].

У разі макроскопічно однорідного та ізотропного феромагнетика векторні співвідношення можна замінити скалярними. Виявилось, що до S -подібної петлі гістерезису (за умов періодичної зміни зовнішнього магнітного поля) веде таке спадкове співвідношення Больцмана–Пікара–Вольтерри для намагніченості:

$$J(t) = J_0(t) + \int_0^t K(H(t)|t, \tau) J_0(\tau) d\tau. \quad (4)$$

за належного вибору ядра $K(H(t)|t, \tau)$ та відомої з експерименту основної кривої намагнічування $J_0(t)$ як функції змінного поля $H(t)$ (цим самим конкретизується фізична система, або матеріал). Аналітична модель для основної кривої намагнічування має такий вигляд [3–5]:

$$J_0(t) = A \cdot th(aH) - B \cdot th(bH). \quad (5)$$

Ядро у виразі (4), сконструйоване з фізичних міркувань, має такий вигляд [4, 5]:

$$K(H|t, \tau) = \frac{\eta_0 e^{-\alpha(t-\tau)}}{1 + 2\beta |H(t) \cdot \dot{H}(t)|}. \quad (6)$$

У результаті отримуємо повне відтворення нелінійної петлі гістерезису в феромагнетиках за допомогою формул (4 – 6).

Висновки

Таким чином, замикання системи рівнянь Максвелла ередитарними (спадковими) матеріальними співвідношеннями типу (4) для фізичних систем з пам'яттю вирішує проблему побудови повної системи еволюційних рівнянь електродинаміки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Руденко О.В. Гигантские нелинейности структуры неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН, Т.176, – 2006 г., – №1.
2. Красносельский М.А., Покровский А.В. – Системы с гистерезисом. – М.: Наука, 1983.
3. Луцик Р.В., Ментковский Ю.Л., Холод В.П. Теория и практика физических систем с памятью. Монография. – К.: КНУТД, – 2006.
4. Ментковский Ю.Л., Холод В.П. Нелокально-ередитарні матеріальні співвідношення електродинаміки фізичних систем з пам'яттю // Вісник КНУТД, – 2008. – №5. – с. 63–66.
5. Mentkovsky Y.L., Kholod V.P. Boltzmann – Picard – Volterra hereditary defining relations in the electrodynamics of physical systems with memory // Укр. фізичний журнал. – 2009. – Т. 54. – №4, – с. 391–397.

Надійшла 01.07.2009