

Висновки

Розроблене інформаційне інтегроване середовище і побудовані алгоритми дали змогу автоматизувати процес розрахунку міжпоїзних і станційних інтервалів. Проведена апробація на реальних даних показала високу ефективність запропонованого підходу.

УДК 621.3.01

А. Павельчак, В. Самотий*, А. Наконечний
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра комп’ютерних систем автоматизи
*Вища школа бізнесу (Республіка Польща)

ГЕОМЕТРИЧНА МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ЧУТЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИХ ПРИСТРОЇВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІПЕРПОВЕРХОНЬ

© Павельчак А., Самотий В., Наконечний А., 2006

Розглянуто спосіб побудови геометричної моделі електромагнетного кола. Запропоновано метод розв’язання задачі параметричної чутливості, що ґрунтується на аналізі гіперповерхонь, побудованих в системі координат математичної моделі.

The mode of build-up of geometrical model of the electromagnetic circuit is considered. The solution method of problem of the parametric sensitivity which has been set up on the analysis of hypersurfaces constructed in a frame of mathematical model is offered.

Вступ

Сучасні вимоги до проектування електромагнетних пристроїв систем керування (ЕМП СК) обумовлюють комплексний підхід до розв’язання задач різного характеру, пов’язаних із необхідністю врахування схемних, конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. Враховуючи велику складність задач, що виникають під час формування теорії ЕМП СК, є необхідність розроблення методів аналізу зміни технічних характеристик цих пристроїв за можливих варіацій різних схемних параметрів. Цю задачу вирішують за застосування ідей та методів теорії чутливості.

Аналіз чутливості дає змогу охарактеризувати зміни критеріїв якості та вихідних характеристик, зумовлених змінами моделі ЕМП СК. На практиці це допомагає інженерам чисельно оцінити зміни, викликані розкидом схемних параметрів. Крім того, за допомогою аналізу чутливості можна розробити алгоритм швидкого коригування розв’язку задачі відповідно до зміни параметрів.

Геометризація математичної моделі ЕМК (електромагнетного кола) дає змогу нам дати геометричне тлумачення її властивостей та застосувати широкі можливості тензорного аналізу під час її дослідження.

Аналіз публікацій

Основні підходи до розв’язання поставленої задачі ґрунтуються на прямих методах диференціювання функцій чутливості або на непрямих методах визначення цих функцій [14]. Непрямі методи набули особливого розвитку у період повільних ЕОМ, де однією з вимог до методів була економія машинного часу. Серед них можна вказати такі методи визначення функцій

чутливості: за передавальною функцією; з використанням напрямлених графів; за допомогою матриць розсіювання, білінійної теореми, перемінних стану; спектральні тощо. З прямих методів [13]: метод фундаментальних систем; метод спряжених систем; звичайний метод прямого числового інтегрування. На практиці під час аналізу конкретних ЕМП СК перевагу надають отриманим числовим результатам, які точно відображають роботу пристрою. Порівнюючи три вказані методи інтегрування рівнянь чутливості, треба зазначити, що у більшості випадків методи фундаментальних та спряжених систем не мають значних переваг порівняно із звичайним методом прямого числового інтегрування і переважно використовувалися для економії машинного часу. Методи аналізу параметричної чутливості набули особливого розвитку в 60–70-ті роки минулого століття. За цією тематикою на цей час з'явилося багато публікацій, організовувалися міжнародні симпозиуми, однак загальної теоретичної бази вирішення проблем чутливості до задач СК так і не було сформовано. Практично відсутні публікації, які відображали розв'язання задачі на конкретних пристроях, особливо щодо ЕМК СК. Щодо застосування геометричних методів аналізу складних систем, то вони набули значного розвитку у механіці суцільного середовища, звідки і взято деякі аналогії для нашої роботи.

Постановка задачі

Вихідні характеристики ЕМК СК [12] $x^i (i = 1, \dots, n)$ залежать від параметрів компонентів ЕМК $u^\alpha (\alpha = 1, \dots, m)$, тобто $x^i = x^i(u^1, \dots, u^m)$. Зміни в значеннях параметрів $\Delta u^\alpha (\alpha = 1, \dots, m)$ викликають зміни $\Delta x^i (i = 1, \dots, n)$ вихідної характеристики, для якої наближено можна записати ^{*}

$$\Delta x^i \approx \frac{\partial x^i}{\partial u^\alpha} \Delta u^\alpha.$$

Це рівняння дає змогу подати відхилення вихідної характеристики залежно від відхилень параметрів. Функцію $\partial x^i / \partial u^\alpha$ в літературі називають функцією чутливості.

Мета роботи

Метою роботи є розроблення методики аналізу параметричної чутливості електромагнетних елементів систем керування, основаної на методі прискореного пошуку усталених режимів з використанням неявних методів числового інтегрування та аналізу параметричних гіперповерхонь, побудованих у результаті моделювання роботи ЕМК.

Розв'язання задачі

Геометрична модель ЕМК. Незалежні змінні x^1, \dots, x^n рівнянь ЕМК описують область (множину точок M розв'язку рівнянь ЕМК) Ω в n -мірному евклідовому просторі R_n

$$M(x^1, \dots, x^n) \in \Omega, \quad (1)$$

Роботу моделі описують кривою (рис. 1), тобто множиною точок $M(x^i)$, заданих параметричними рівняннями (t – параметр часу)

$$x^i = x^i(t), \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (2)$$

Ця інтегральна крива (2) є розв'язанням деякого векторного поля ζ^i (з цим векторним полем пов'язана система рівнянь динаміки ЕМК) [8]

$$\frac{dx^i}{dt} = \zeta^i(t, x^1(t), \dots, x^n(t)) \quad (3)$$

* Тут і надалі в роботі, згідно з положенням у тензорному численні про підсумовування, припускають, що за німими двічі повторюваними індексами, один раз внизу і один раз нагорі, здійснюється підсумовування, і тому знак суми опускається.

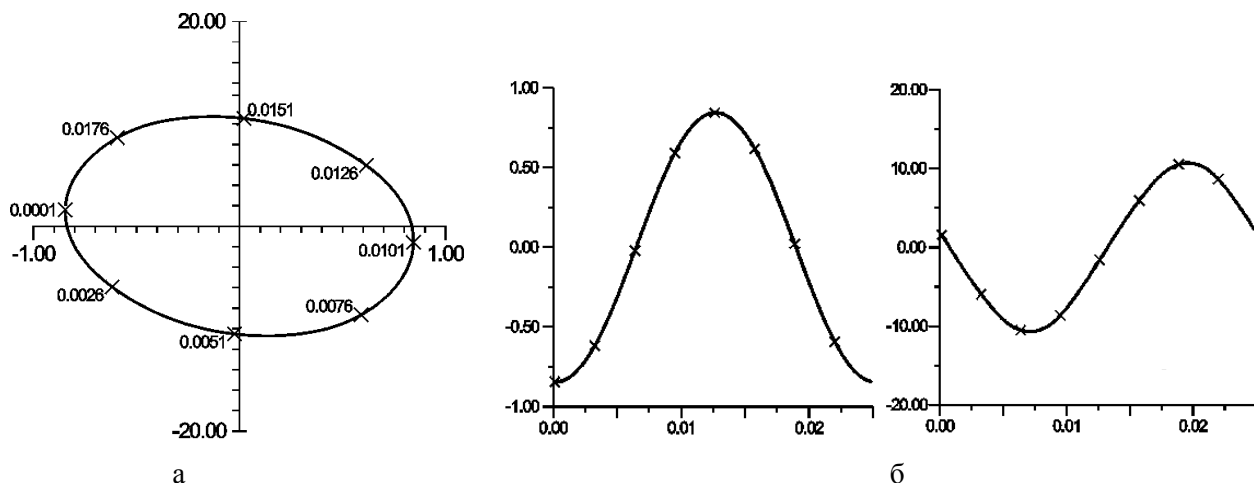


Рис. 1. Модель однофазного трансформатора з активним навантаженням:
 а – матмодель в координатній системі; б – часові діаграми

Для спрощення розв’язання цих рівнянь використовують додаткову систему криволінійних координат [10]

$$y^i = y^i(x^1, \dots, x^n) \quad (4)$$

Після чого рівняння динаміки ЕМК набувають вигляду

$$\frac{dx^i}{dt} = \frac{\partial x^i}{\partial y^j} \frac{dy^j}{dt} \quad (5)$$

чи

$$\zeta^i = B_j^i \tau^j \quad (6)$$

де $B_j^i = \partial x^i / \partial y^j$ – координати зворотної матриці переходу до нових криволінійних координат. Пряма матриця

$$A_j^i = \frac{\partial y^i}{\partial x^j}, \quad B_j^i A_k^j = \delta_k^i.$$

На інтервалі часу $[t_{(m)}, t_{(m-1)}]$ інтегральну криву $x^i(t)$ апроксимуємо поліномом

$$x^i(t) = \prod_{(m,N)}^i(t) = \sum_{k=0}^N a_{(k)}^i(t - t_{(m-1)})^k, \quad m, N=0,1,2,\dots, \quad (7)$$

де N – порядок полінома.

Коефіцієнти $a_{(k)}^i$ можна визначити різними способами. Наприклад, виходячи з умови збігу значень полінома $\prod_{(m,N)}^i(t)$ і функції $x^i(t)$ у моменти часу $t_{(m)}$ і $t_{(m-1)}$, а також із рівності відповідних похідних $N-1$ за часом при $t_{(m-1)}$ чи з умови збігу значень полінома $\prod_{(m,N)}^i(t)$ і функції $x^i(t)$ у моменти часу $t_{(m-1)}, t_{(m-2)}, \dots, t_{(m-n)}$ та першої похідної у момент $t_{(m)}$. У першому випадку ми отримаємо сімейство однокрокових, а у другому – багатокрокових неявних методів числового інтегрування.

Диференціюючи (7) за t , отримуємо

$$\frac{dx^i}{dt} = \sum_{k=1}^N k a_{(k)}^i (t - t_{(m-1)})^{k-1} \quad (8)$$

Визначивши $a_{(k)}^i$, згідно з (8), отримаємо вираз першої похідної в момент $t_{(m)}$

$$\frac{dx_{(m)}^i}{dt} = a_{(N)}^i x_{(m)}^i + b_{(N)}^i, \quad (9)$$

де $a_{(N)}, b_{(N)}$ є постійними коефіцієнтами на кроці інтегрування $[t_{(m)}, t_{(m-1)}]$.

Для однокрокових методів практичний інтерес вираз (9) має за $N=1$ (неявний метод Ейлера) та $N=2$ (метод трапеції)

$$a_{(1)} = \frac{1}{\Delta t}, b^{i_{(1)}} = -\frac{x^{i_{(m-1)}}}{\Delta t}; a_{(2)} = \frac{2}{\Delta t}, b^{i_{(2)}} = -\frac{2x^{i_{(m-1)}}}{\Delta t} - \frac{dx^{i_{(m-1)}}}{dt}, \quad (10)$$

для багатокрокових – за $N \leq 6$. Наведемо значення $a_{(N)}, b^{i_{(N)}}$ для $N=1,2,3$ за постійного кроку інтегрування:

$$\left. \begin{aligned} a_{(1)} &= \frac{1}{\Delta t}, b^{i_{(1)}} = -\frac{x^{i_{(m-1)}}}{\Delta t}, a_{(2)} = \frac{3}{2\Delta t}, b^{i_{(2)}} = \frac{-4x^{i_{(m-1)}} + x^{i_{(m-2)}}}{2\Delta t}, \\ a_{(3)} &= \frac{11}{6\Delta t}, b^{i_{(3)}} = \frac{-18x^{i_{(m-1)}} + 9x^{i_{(m-2)}} - 2x^{i_{(m-3)}}}{6\Delta t}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Ці коефіцієнти отримані із коефіцієнтів Гіра.

В усталеному режимі інтегральна крива (2) векторного поля ξ^i повинна задовольняти рівняння періодичності, яке запишемо у вигляді певного нелінійного рівняння

$$f(x_0^i) = x_0^i - x_T^i(x_0^1, \dots, x_0^n) = 0, \quad (12)$$

де T – період вхідної дії.

$$x_T^i(x_0^1, \dots, x_0^n) = x^i = x^i(t, x_0^1, \dots, x_0^n) \Big|_{t=T} \quad (13)$$

– інтегральна крива поля ξ^i з початковими умовами $x^i|_{t=0} = x_0^i$; (13) задає відображення нашої області в себе, що залежить від параметра t (зсув на час t вздовж інтегральних кривих). Це відображення визначене за малих t в околі цієї точки (x_0^1, \dots, x_0^n) і є локально дифеоморфізмом [8].

Нелінійне рівняння (12) розв'язуємо ітераційним методом Ньютона

$$x_0^{i(k+1)} = x_0^{i(k)} - \tilde{f}^i_{,j} \left(x_0^{i(k)} \right) f^{j(k)}, \quad (14)$$

де $\tilde{f}^i_{,j} \left(x_0^{i(k)} \right)$ – координати зворотної матриці Якобі рівняння періодичності. Диференціюючи (12)

за x_0^i , отримаємо

$$f^i_{,j} \left(x_0^i \right) = \delta^i_j - \Sigma^i_j; \quad \Sigma^i_j = \frac{\partial x_T^i(x_0^1, \dots, x_0^n)}{\partial x_0^j}, \quad (15)$$

де δ^i_j – координати одиничної матриці; Σ – матриця чутливостей до початкових умов.

Σ фактично є матрицею переходу до відображення (13) або, як її називають у літературі, матрицею Якобі відображення (13).

Під час переходу до криволінійної системи координат (4) відбувається подвійне перетворення системи координат і, відповідно, Σ можна подати так

$$\Sigma^i_j = \frac{\partial x^i}{\partial y^p} \frac{\partial y^p(t, x_0^1, \dots, x_0^n) \Big|_{t=T}}{\partial x_0^j} = B^i_p S^p_j \Big|_{t=T}, \quad (16)$$

де $S^p_j = \frac{\partial y^p(t, x_0^1, \dots, x_0^n)}{\partial x_0^j}$, Σ, B, S – матриці переходу.

Аналогічно до (15), S назвемо матрицею чутливостей до початкових умов x_0^i у вибраній додатковій системі криволінійних координат. Її визначаємо в результаті сумісного інтегрування з (5) додаткової системи диференціальних рівнянь у варіаціях. Для її отримання диференціюємо

$$\frac{dy^i}{dt} = \tau^i \left(t, y^i(t, x_0^1, \dots, x_0^n) \right) \text{ за параметром } x_0^i$$

$$\frac{\partial \frac{dy^i}{dt}}{\partial x_0^j} = \frac{\partial \tau^i}{\partial y^p} \frac{\partial y^p(t, x_0^1, \dots, x_0^n)}{\partial x_0^j} \quad (17)$$

У лівій частині змінимо порядок диференціювання

$$\frac{dS_{j}^i}{dt} = \frac{\partial \tau^i}{\partial y^p} \frac{\partial y^p(t, x_0^1, \dots, x_0^n)}{\partial x_0^j} = Q_{p}^i S_{j}^p. \quad (18)$$

Рівняння (18) також дискретизуємо

$$\frac{dS_{j(m)}^i}{dt} = a_{S(N)} S_{j(m)}^i + b_{S}^i j(N). \quad (19)$$

Рівняння (18) та (19) розв'язуємо ітераційним методом Ньютона.

Початкове наближення $x_0^{i(0)}$ на першому кроці задаємо довільним, як правило, нульовим.

Початкові умови $S_{0_j}^{i(k)}$ згідно з (15), (16) повинні неухильно задовольняти вимогу

$$S_{0_j}^{i(k)} = A_{0_j}^{i(k)}. \quad (20)$$

Ітераційний процес зупиняємо у випадку виконання нерівності

$$\text{mod} \left(\frac{x_0^{i(k)}}{x_0^{i(k+1)}} - 1 \right) < \varepsilon, \quad (21)$$

де ε – помилка збіжності ітераційного процесу.

Параметрична чутливість. Підхід до вирішення поставленої задачі ґрунтується на побудові m -мірної поверхні у вибраному нами n -мірному евклідовому просторі (1). Поверхню задають параметричними рівняннями

$$x^i = x^i(u^1, \dots, u^m), \quad (i=1, \dots, n), \quad (22)$$

де (u^1, \dots, u^m) – незалежні (гауссові) параметри, що пробігають деяку зв'язну область змін Ω_u .

Розмірність нашої поверхні може набувати значення $m=1, \dots, n-1$. У випадку $m=n-1$, поверхня називається гіперповерхнею. Як видно зі структури ЕМК, кількість лінійно незалежних параметрів відповідає гіперповерхні.

Оскільки наша геометрична модель ЕМК розглядається в часі та має періодичний характер, то ця поверхня отримує статус “рухливої” [7, 9], іншими словами, ми маємо сімейство поверхонь, що залежать від параметра $0 \leq t \leq T$ (рис. 2)

$$x^i = x^i(u^1, \dots, u^m, t). \quad (23)$$

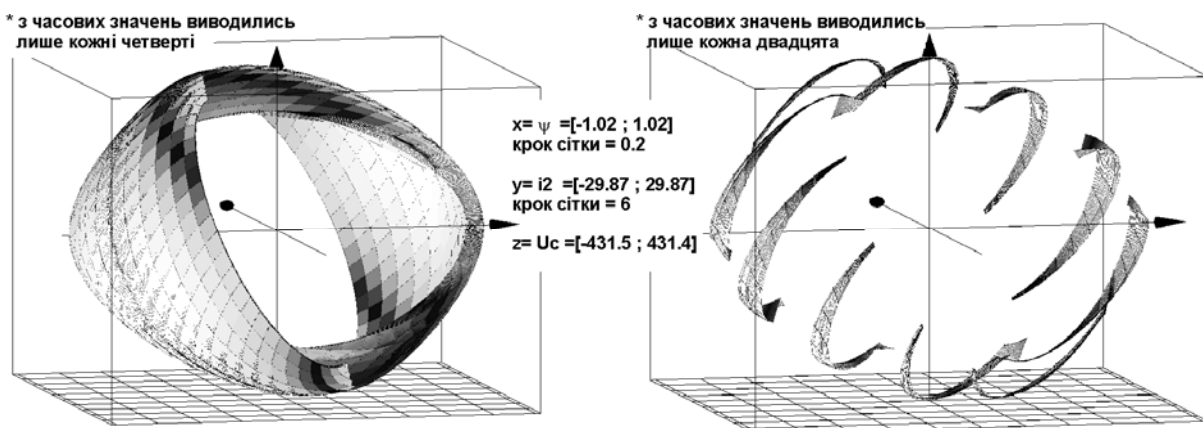


Рис. 2. Часові діаграми “рухливої” гіперповерхні однофазного трансформатора з ємнісним навантаженням із зміною постійних параметрів $C_n = 5 - 265 \text{ мкФ}$; кр. намагн.: коефіцієнт $a_3 = 0.1 - 9.2$

У випадку існування шуканої гіперповерхні [11], функції (23) неодмінно мають задовольняти диференціальні рівняння

$$\frac{\partial x^i}{\partial u^\alpha} = \xi^i_\alpha(u^1, \dots, u^m, t). \quad (24)$$

Вираз (24) має тензорний характер; ξ^i_α забезпечує перехід від геометрії евклідового простору (1) до внутрішньої геометрії поверхні і, аналогічно до (15) та (16), називається *матрицею параметричних чутливостей*. Зазначимо також, що ξ^i_α є контраваріантним вектором у просторовій системі координат або коваріантним вектором на нашій поверхні [6].

Щоб уникнути неясностей у нижченаведених формулах, для позначення тензорної похідної вживатимемо прийнятий у літературі символ D [11].

Перепишемо рівняння динаміки (3) із врахуванням (23)

$$\frac{Dx^i}{\partial t} = \zeta^i(u^\alpha, t, x^1(u^\alpha, t), \dots, x^n(u^\alpha, t)) \quad (25)$$

та продиференціюємо за u^α

$$\frac{\partial^2 x^i}{\partial u^\alpha \partial t} = \frac{\partial \zeta^i}{\partial x^j} \frac{\partial x^j}{\partial u^\alpha} + \frac{\partial \zeta^i}{\partial u^\alpha}. \quad (26)$$

Підставимо (24) в (26)

$$\frac{D\xi^i_\alpha}{\partial t} = \frac{\partial \zeta^i}{\partial x^j} \xi^j_\alpha + \frac{\partial \zeta^i}{\partial u^\alpha}. \quad (27)$$

В усталеному режимі $x_0^i = x_T^i$, і тому ξ^j_α – періодичний розв'язок (27).

Якщо визначення часткових похідних за x^i в ЕМК є складною процедурою, то доцільно шукати параметричну чутливість у додатковій системі координат (4). Запишемо наше сімейство поверхонь (23) у додатковій системі криволінійних координат (4)

$$y^i = y^i(u^1, \dots, u^m, t), \quad (28)$$

$$\chi^i_\alpha = \frac{\partial y^i(u^1, \dots, u^m, t)}{\partial u^\alpha}. \quad (29)$$

$$\frac{Dy^i}{\partial t} = \tau^i(u^\alpha, t, y^1(u^\alpha, t), \dots, y^n(u^\alpha, t)) \quad (30)$$

Візьмемо від (30) тензорну похідну за u^α [9], враховуючи (29)

$$\frac{D\chi^i_\alpha}{\partial t} = \frac{\delta \tau^i}{\partial u^\alpha} + \Gamma^i_{jk} \tau^k \frac{\partial y^j}{\partial u^\alpha}, \quad (31)$$

де $\frac{\delta \tau^i}{\partial u^\alpha}$ – повна часткова похідна за u^α , Γ^i_{jk} – символ Крістофеля 2-го роду:

$$\Gamma^i_{mr} = A^i_j \frac{\partial^2 x^j}{\partial y^m \partial y^r} = - \frac{\partial^2 y^i}{\partial x^j \partial x^n} B^n_m B^j_k$$

У кінцевому варіанті (31) набуде такого вигляду

$$\frac{D\chi^i_\alpha}{\partial t} = \frac{\partial \tau^i}{\partial y^j} \chi^j_\alpha + \frac{\partial \tau^i}{\partial u^\alpha} + \Gamma^i_{jk} \tau^k \chi^j_\alpha = \left(\frac{\partial \tau^i}{\partial y^j} + \Gamma^i_{jk} \tau^k \right) \chi^j_\alpha + \frac{\partial \tau^i}{\partial u^\alpha} \quad (32)$$

Для пошуку допоміжної чутливості інтегруванню підлягає лише $\frac{\delta \tau^i}{\partial u^\alpha}$, який запишемо у такому вигляді

$$\frac{\partial \chi^i_\alpha}{\partial t} = \frac{\partial \tau^i}{\partial y^j} \chi^j_\alpha + \frac{\partial \tau^i}{\partial u^\alpha} \quad (33)$$

Умову періодичного розв'язку рівняння (33) запишемо так

$$f(\chi_{0\alpha}^i) = \chi_{0\alpha}^i - \chi_{T\alpha}^i(\chi_{0\alpha}^i) = 0, \quad (34)$$

Періодичний розв'язок рівняння допоміжної параметричної чутливості (34) знаходимо методом простої ітерації

$$\chi_{0\alpha}^{i(k+1)} = \chi_{T\alpha}^i(\chi_{0\alpha}^{i(k)}) \quad (35)$$

Інтегрування здійснюватимемо неявним методом.

Початкове наближення $\chi_{0\alpha}^{i(0)}$ задаємо довільним, як правило, нульовим.

Ітераційний процес зупиняємо у разі виконання нерівності

$$\text{mod} \left(\frac{\chi_{0\alpha}^{i(k)}}{\chi_{0\alpha}^{i(k+1)}} - 1 \right) < \varepsilon, \quad (36)$$

де ε – помилка збіжності ітераційного процесу.

Параметричну чутливість (24) обчислюємо, здійснюючи зворотний перехід від криволінійних координат y^i у (29) до декартових [6]

$$\xi_{\alpha}^i = B_j^i \chi_{\alpha}^j. \quad (37)$$

Варто зазначити, що наведені вище виведення можна коригувати за основними рівняннями динаміки ЕМК (5), де в B_j^i можуть входити параметри u^{α} .

Результати моделювання.

Для геометричної моделі однофазного трансформатора з ємнісним навантаженням, часові діаграми якої зображені на рис. 2, проведено моделювання функцій параметричних чутливостей (24). Для моделювання було використано такі вхідні дані: $U_{1\max}=311$ В; $\alpha_1=100$ Гн⁻¹; $\alpha_2=44$ Гн⁻¹; $r_1=7$ Ом; $r_2=3$ Ом; $f=50$ Гц. Основна крива намагнечування апроксимована виразом $\varphi(\psi) = a_3\psi^3$. Як постійні параметри, за якими визначають функції чутливості, взято $u^{\alpha} = (a_3, C)$.

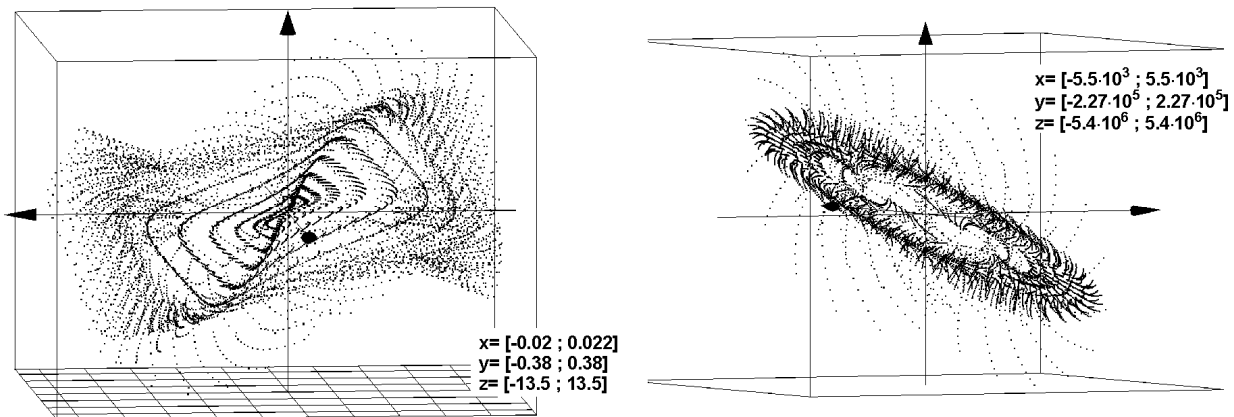


Рис. 3. Значення векторів параметричної чутливості ξ_1^i та ξ_2^i в координатній системі моделі ЕМК із зміною параметрів $C_n = 5 - 265$ мкФ; кр. намагн.: коефіцієнт $a_3 = 0.1 - 9.2$

Як зазначалося вище, матрицю параметричних чутливостей (24) подано у вигляді контраваріантних векторів у просторовій системі координат ЕМК або як коваріантні вектори на нашій поверхні. На рис. 3 наведено значення контраваріантних векторів чутливості $\partial x^i / \partial a_3$ та $\partial x^i / \partial C$ у координатах моделі трансформатора під час табуляції постійних параметрів $u^{\alpha} = (a_3, C)$. Для аналізу функцій чутливості доцільно використовувати їхні діючі значення за період (рис. 4)

$$\xi_D = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \xi^2(t) dt}.$$

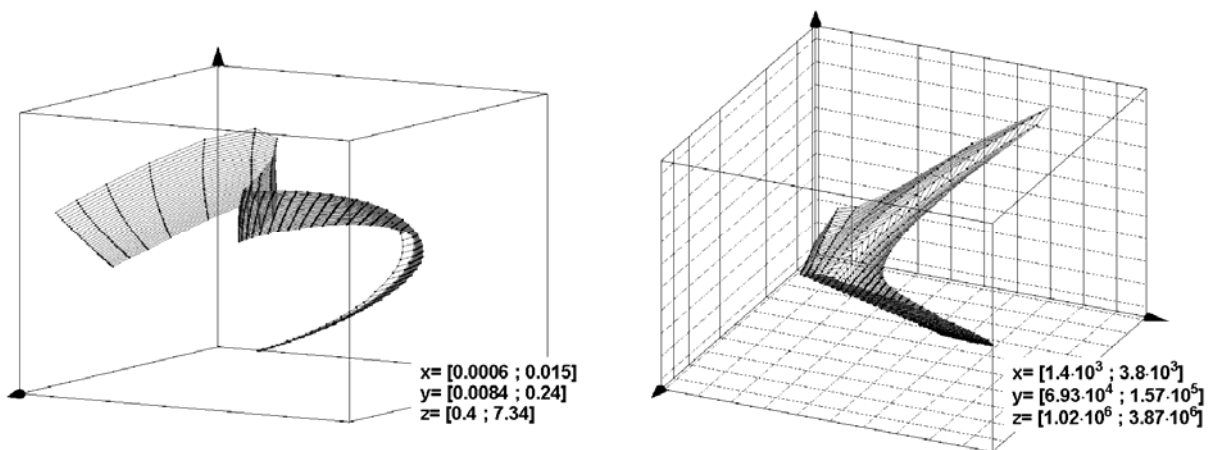


Рис. 4. Діючі значення за період векторів параметричної чутливості ξ_1^i та ξ_2^i

На рис. 5 наведено результати аналізу функцій чутливостей у діючих значеннях за період коваріантних векторів $\partial\psi/\partial u^\alpha$, $\partial i_2/\partial u^\alpha$ та $\partial u_c/\partial u^\alpha$ на поверхні. Тут чітко видно розкид значень функцій чутливостей із зміною параметра C , особливо у межах від 5 до 55 мкФ.

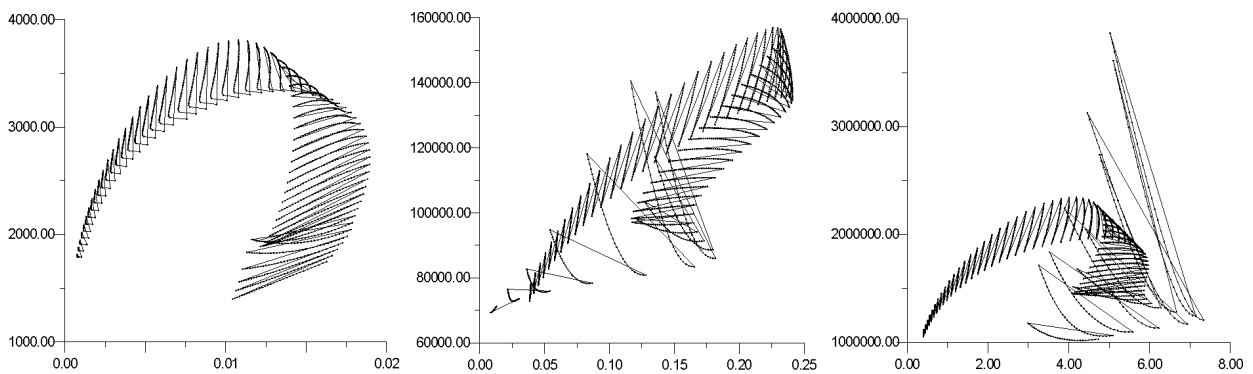


Рис. 5. Діючі значення за період векторів параметричної чутливості ξ_α^1 , ξ_α^2 та ξ_α^3

Висновок.

Запропонований підхід до аналізу задачі параметричної чутливості електромагнетних пристроїв набагато спрощує розуміння самої суті проблеми та дає змогу застосувати для її аналізу усю потужність геометричних методів. Цим отримують деякі властивості рівнянь параметричної чутливості без їх числового розв'язання.

1. Самотий В., Павельчак А., Мінкіна В. Розрахунок параметричної чутливості електромагнетних кіл неявними методами. // Вісн. Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2001. – № 433. – С. 102–106. 2. Самотий В.В. Математичне моделювання стаціонарних процесів електромагнетних пристроїв керування. – Львів: Фенікс, 1997. – 170 с. 3. Эйприлл Г., Трик Г. Анализ стационарного режима нелинейных цепей с периодическими входными сигналами. – В кн.: Автоматизация в проектировании. – М.: Мир, 1972. – С. 148–155. 4. Чабан В.И., Самотий В.В. Ускоренный поиск периодических режимов трехфазных трансформаторов // Электрические сети и системы: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – К.: Выща шк., 1986. – Вып. 22. – С. 110–115. 5. Чабан В. Математичне

модування електромеханічних процесів. – Львів: Вид-во Держ. ун-ту “Львівська політехніка”, 1997. – С. 50–52. 6. Мак-Коннел А.Дж. Введение в тензорный анализ (с приложениями к геометрии, механике и физике). – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 411 с. 7. Норден А.П. Теория поверхностей. – М.: Гос. изд-во тех.-теорет. лит., 1956. – 260 с. 8. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия: Методы и приложения. – М.: Наука, 1986. – 760 с. 9. Повстенко Ю.З., Подстригач Я.С. Дифференцирование по времени тензоров, заданных на поверхности движущейся в трехмерном евклидовом пространстве // ПММ. – 1983. – Т. 47, вып. 6. – С. 1038–1045. 10. Парс Л.А. Аналитическая динамика. – М.: Наука, 1971. – 636 с. 11. Рашевский П.К. Риманова геометрия и тензорный анализ. – М.: Наука, 1964. – 665 с. 12. Райнишке. К. Модели надежности и чувствительности систем. – М.: Мир, 1979. – 449 с. 13. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении / Под ред. Е.Н. Розенвассера и Р.М. Юсупова. – М.: Энергия, 1971. – 344 с. 14. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. – М.: Сов. радио, 1973. – 200 с.

УДК 621.311.13

В. Ванько

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронно-обчислювальних машин

ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ПІД ЧАС ПЕРЕБІГУ ПРОЦЕСІВ ЧАСОВИХ ПЕРЕНАПРУГ ТА ЗАПАДИН НАПРУГИ В МЕРЕЖАХ

© Ванько В., 2006

Наведено алгоритми визначення показників якості електроенергії під час проходження часових перенапруг і западин напруги в електричних мережах загального призначення з використанням перспективного математичного апарату – wavelet-перетворення, а також запропоновано узагальнену структуру засобу вимірювання переліку необхідних показників.

Algorithms of determination of electric energy quality indices of the passing of time voltage overstrains and depressions in the electrical networks of common use with the employment of a promising mathematical apparatus – wavelet-transformation and also the generalized structure of the necessary index enumeration measurement means.

Вступ

Під час виконання комутацій, регулівних та стабілізаційних заходів в структурах перетворення і розподілу електроенергії (ЕЕ) енергопостачальних організацій виникають швидкі процеси різкого погіршення її якості – так звані часові перенапруги та западини напруги [1].

Ці процеси становлять серйозну небезпеку як для основних об'єктів енергосистеми, так і стосовно широкого кола промислового і побутового устаткування різноманітного призначення. Причому, з точки зору надійності незадовільним вважають не лише збільшення напруги мережі відносно до номінального значення $U_{ном}$, але й її зменшення нижче від гранично допустимого рівня, що декларується відповідними вітчизняними і міжнародними нормативними документами [1, 2].

Отже, контроль і оцінка якості ЕЕ та постійне вдосконалення засобів вимірювання (ЗВ) її динамічних показників є важливими та актуальними проблемами.