

- розв'язання числовим методом лінійного векторного рівняння (39);
- обчислення поправок $\Delta\varphi_k^{<i>}$, $\Delta\varphi_{kw}^{<i>}$, $\Delta i_{kg}^{<i>}$ відповідно за формулами (24), (34), (29);
- обчислення і-го наближення векторів φ_n , φ_{kw} , i_{kg} відповідно за формулами

$$\varphi_n^{<i>} = \varphi_n^{<i-1>} + \Delta\varphi_n^{<i>}; \quad \varphi_{kw}^{<i>} = \varphi_{kw}^{<i-1>} + \Delta\varphi_{kw}^{<i>}; \quad \Delta i_{kg}^{<i>} = i_{kg}^{<i-1>} + \Delta i_{kg}^{<i>};$$

- обчислення і-го наближення $\varphi_k^{<i>}$, $i_k^{<i>}$, $u_{kgR}^{<i>}$, $\psi_{kg}^{<i>}$, $u_{kgL}^{<i>}$, $q_{kg}^{<i>}$, $u_{kgC}^{<i>}$ векторів φ_k , i_k , u_{kgR} , ψ_{kg} , u_{kgL} , q_{kg} , u_{kgC} відповідно за формулами (10), (1), (4), (5), (13), (12), (6).

Описаний алгоритм використовується в навчальному процесі при викладанні розділу “Лінійні та нелінійні багатополосники” предмета “Теоретична електротехніка”.

УДК 621.3.048: 538.552.2

І.В. Хімюк, С.С. Кокошин, Н.Х. Еркенов

Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ,

Карачаєво-Черкеський технологічний інститут, м. Черкеськ, РФ

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЕКРАНУВАННЯ ШАРУВАТОЇ СТРУКТУРИ У ЗМІННОМУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ ПОЛІ

© Хімюк І.В., Кокошин С.С., Еркенов Н.Х., 2001

На основі розв'язку задачі з визначення електромагнітного поля в шаруватій структурі з довільною кількістю шарів, отримані її екрануючі характеристики (коефіцієнти екранування). Аналітичні вирази для коефіцієнтів екранування шаруватої структури є узагальненням відомих співвідношень.

Because of solutions of the task under the definition of an electromagnetic field in a stratified structure with any number of stratum, are obtained its shielding performances (factors of screening). The analytical expressions for factors of screening of a stratified structure are generalization of known relations.

При створенні електротехнічного та електроенергетичного обладнання виникає необхідність у зменшенні інтенсивності змінного електромагнітного поля з метою запобігання його шкідливого впливу на роботу високочутливих елементів автоматики, ліній зв'язку, обчислювальних комплексів.

Найбільш ефективним засобом зменшення інтенсивності електромагнітних полів є екранування [1–4, 8]. Для розрахунку екрануючих характеристик (коефіцієнтів екранування) використовуються різні методи [1–5, 8]. Не вдаючись до їх аналізу, треба відмітити, що в [2, 4] розглядаються спрощені математичні моделі екрана, а в [1, 3, 8] – математичні моделі стосовно екранування окремих елементів і вузлів електротехнічного і електроенергетичного устаткування.

Електромагнітні процеси в шаруватих структурах суттєво відрізняються від процесів у однорідних середовищах. У шаруватих структурах відмічені певні ефекти [6, 8].

Це зумовлює необхідність більш детального розгляду питання щодо екрануючих характеристик шаруватих структур.

Розглянемо узагальнену модель шаруватої структури, яка зображена на рис.1. Кожний k -й шар будемо характеризувати товщиною $d_k = r_k - r_{k-1}$ питомою електропровідністю σ_k і магнітною проникністю μ_k . На поверхні $r = r_0$ задане джерело збудження електромагнітного поля, що має вигляд $A_z \exp i(\omega t - n\varphi)$.

За таких умов можна так сформулювати задачу: при заданому джерелі збудження поля визначити екрануючі характеристики (коефіцієнти екранування) шаруватої структури для складових векторів електромагнітного поля.

Під коефіцієнтами екранування будемо розуміти значення, що визначається за співвідношеннями [1, 8]

$$S^{(k)} = |F^k / F^{(0)}|, \quad (1)$$

де $F^{(k)}$ – складова напруженості (електричної чи магнітної) на нижній границі k -го шару; $F^{(0)}$ – відповідна складова поля на тій же поверхні при відсутності екрана (k -шару).

Використовуючи результати [7], складові векторів поля у відсутності шаруватої структури будуть

$$E_z^{(1)}(r) = \frac{1}{2} A_z Z^0 (r/r_0)^n, \quad r \leq r_0, \quad (2)$$

$$H_\varphi^{(1)}(r) = \frac{1}{2} A_z (r/r_0)^{n-1}, \quad r \leq r_0, \quad (3)$$

$$H_r^{(1)}(r) = \frac{\pm i}{2} A_z (r/r_0)^{n-1}, \quad r \leq r_0. \quad (4)$$

Знайдемо спочатку екрануючі характеристики k -го циліндричного шару, що знаходиться при $r_{k-1} \leq r \leq r_k$ з характеристиками $\sigma = \sigma_k$, $\mu = \mu_k$, вважаючи, що при $0 \leq r \leq r_{k-1}$ маємо непровідне середовище з характеристиками $\sigma = 0$ і $\mu = \mu_0$ (рис. 2).

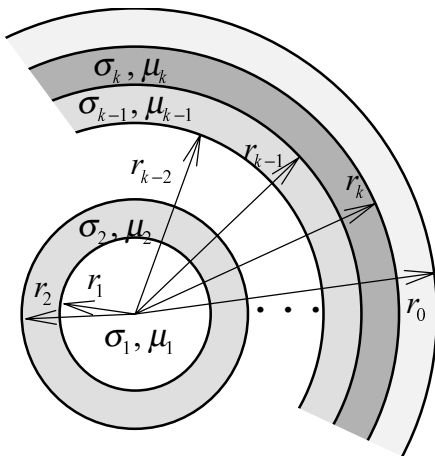


Рис. 1. Узагальнена модель шаруватої структури

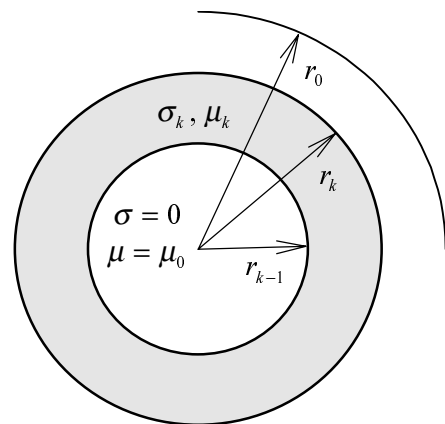


Рис. 2. Непровідне середовище

Враховуючи результати розв'язку відповідних крайових задач для циліндричного шару, що наведені в [7] і враховуючи (1) та (2)–(4), одержимо

$$S_E = \left| Z \left(\frac{r_k}{r_{k-1}} \right)^n Z^{(k-1)} F^{(k)} \right|; \quad (5)$$

$$S_{H_\phi} = \left| Z \cdot Z^0 \left(\frac{r_k}{r_{k-1}} \right)^n \left(\frac{r_{k-1}}{r_0} \right) F^{(k)} \right|; \quad (6)$$

$$S_{H_r} = \left| Z \cdot \left(\frac{r_k}{r_{k-1}} \right)^n \frac{\mu_0}{\mu_k} Z^{(k-1)} F^{(k)} \right|. \quad (7)$$

У виразах (5)–(7) значення Z , $F^{(k)}$ і Z^0 мають вигляд

$$Z = 2Z^{(k)} / (Z_0^{(k)} + Z^{(k)}) \quad (8)$$

$$F^{(k)} = \Delta_k^{-1} Z_k^{-1} \cdot R_{k-1}^{-1}; \quad (9)$$

$$Z^0 = i\omega\mu_0 r_0 / n; \quad Z_0^{(k)} = i\omega\mu_0 r_k / n; \quad Z_k = i\omega\mu_k / k_k; \quad k_k^2 = i\omega\sigma_k \mu_k \quad (10)$$

$$R_k = k_k r_k;$$

$$R_{k-1} = k_k r_{k-1};$$

$$\Delta_k = [I_n(R_k) \cdot K_n(R_{k-1}) - K_n(R_k) \cdot I_n(R_{k-1})] + \\ + Z^{(k-1)} Z_k^{-1} [I_n'(R_{k-1}) \cdot K_n(R_k) - K_n'(R_{k-1}) \cdot I_n(R_k)]. \quad (11)$$

У формулі (11) I_n , K_n та I_n' , K_n' – модифіковані функції Бесселя та їх похідні за аргументом. Значення $Z^{(k)}$ є вхідним імпедансом всієї шаруватої структури [7] при $0 \leq r \leq r_k$. Значення $Z^{(k-1)}$, що присутнє у (11), є вхідним імпедансом шароватої структури, що знаходяться при $r \leq r_{k-1}$. У цьому випадку значення має вигляд

$$Z^{(k-1)} = i\omega\mu_0 r_{k-1} / n. \quad (12)$$

Наведені вирази (5)–(7) для екрануючих характеристик можна використовувати без обмежень на електромагнітні та геометричні параметри циліндричного шару. У цьому розумінні вони є узагальненням екрануючих характеристик, що наведені в [2–4].

Коефіцієнти екранування для циліндричного шару, які наведені в [2–4], отримані у припущенні, що шар є “тонкостінним” і перебуває під дією поля високої частоти.

Використовуючи співвідношення (5)–(7) та враховуючи, що при $|kr| \gg 1$ маємо випадок, коли екран знаходиться під дією поля високої частоти. При цьому із (5)–(7) знаходимо

$$S_E = \left(\frac{r_k}{r_{k-1}} \right)^{n+\frac{1}{2}} \frac{2}{\left| ch(k_k d_k) \cdot \left\{ 1 + \frac{r_k}{r_{k-1}} + th(k_k d_k) \cdot \left[K_1 + \frac{r_k}{r_{k-1}} \cdot \frac{1}{K_1} \right] \right\} \right|}; \quad (13)$$

$$S_{H_\phi} = S_E; \quad (14)$$

$$S_{H_r} = \left(\frac{\mu_0}{\mu_k} \right) S_E, \quad (15)$$

$$\text{де } K_1 = \left(\frac{\mu_k}{\mu_0} \right)^{-1} \cdot \frac{1}{n} \cdot (k_k r_k).$$

Приймаючи у (8) умову “тонкостінності” екрана $\frac{r_k}{r_{k-1}} \rightarrow 1$, яка використовується у [2–4] для отримання екрануючих характеристик, отримаємо добре відому формулу, що наведена у [4].

Для перевірки отриманого коефіцієнта екранування S_E , були проведені розрахунки по співвідношенню (8) і порівняні з результатами експерименту, що наведені у [3]. Результати експерименту і розрахунку показані на рис. 3, де замість коефіцієнта екранування S_E побудована залежність оберненого йому значення $a_E = 1/|S_E|$ від кількості пар полюсів n заваднесучого поля, яка називається ступенем екранування. Як видно із рис. 3, розрахункові і експериментальні (х) значення практично збігаються.

При розрахунку були використані такі числові значення: $r_{k-1} = 0,11$ м; $d_k = r_k - r_{k-1} = 1,5$ і 2 мм, $\mu_k / \mu_0 = 1$; $f = 500$ Гц; $\sigma_k = 5,15 \cdot 10^7$ 1/(Ом·м).

Отримані співвідношення (5)–(7) можна узагальнити на шарувату структуру, що складається з m – шарів ($m = 1, 2, \dots, k$) (рис. 1), причому шарувата структура може мати як провідні, так і непровідні шари з довільним їх чередуванням.

При цьому отримаємо

$$S_E^{(m)} = \left(\frac{r_k}{r_{k-m}} \right)^n \frac{2Z^{(k)}}{Z_0^{(k)} + Z^{(k)}} \prod_{l=1}^m \left[Z^{(k-l)} / (Z_{k-l+1} \cdot \Delta_{k-l+1} \cdot k_{k-l+1} \cdot r_{k-l}) \right]; \quad (16)$$

$$S_{H_\varphi} = \left(\frac{r_k}{r_{k-m}} \right)^n \cdot \frac{2Z^{(k)}}{Z_0^{(k)} + Z^{(k)}} \cdot \left(\frac{r_{k-m}}{r_0} \right) \cdot (\Delta_{k-m+1}^{-1} Z_{k-m+1}^{-1} \cdot (k_{k-m+1} r_{k-m})^{-1} \cdot Z_0 \prod_{l=2}^m [Z^{(k-l)} / (Z_{k-l+1} \cdot \Delta_{k-l+1} \cdot k_{k-l+1} \cdot r_{k-l})]); \quad (17)$$

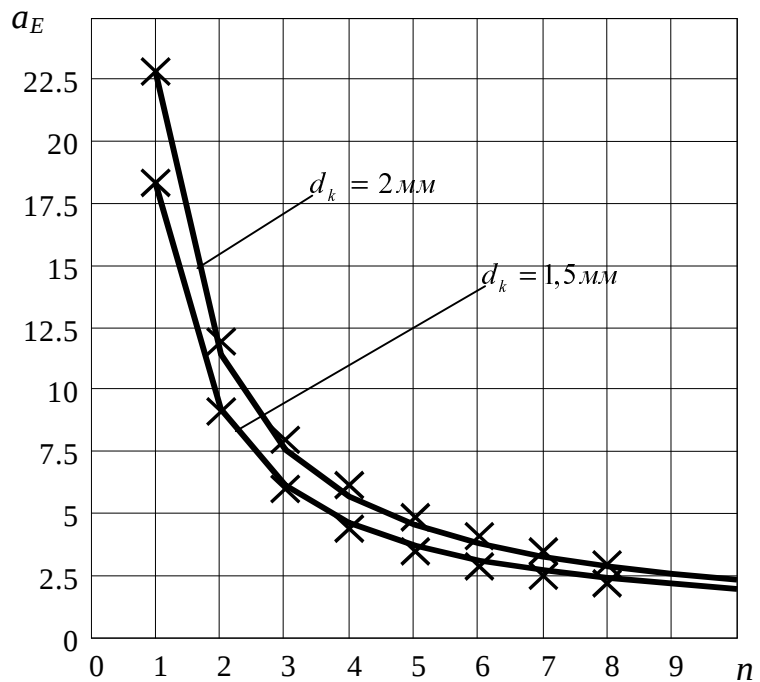


Рис. 3. Результати експерименту

$$S_{H_r} = \left(\frac{\mu_0}{\mu_{k-m+1}} \right) \cdot S_E^{(m)}. \quad (18)$$

У наведених співвідношеннях r_k – верхній, а r_{k-m} – нижній радіуси, які обмежують шаровату структуру, що складається з m – шарів. Значення $Z^{(k)}$ – вхідний імпеданс всієї шароватої структури.

Отримані вирази (16)–(18) для коефіцієнтів екранування змінного електромагнітного поля шароватої структури, що складається з m – шарів, можна використати як для аналітичних (декілька шарів), так і для числових розрахунків.

При числових розрахунках передусім необхідно визначити вхідний імпеданс шароватої структури $Z^{(k)}$, користуючись або рекурентними співвідношеннями, або розв’язуючи відповідну задачу Коші [7]. Наступний етап зводиться до визначення характеристик шару Z_k, Δ_k , та визначення коефіцієнтів екранування за співвідношеннями (15)–(18).

1. Аполлонский С.М. Расчет электромагнитных экранирующих оболочек. – Л., 1982. – 186 с. 2. Гроднев И.М. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. – М., 1972. – 111 с. 3. Емельянов А.В., Державина А.Ю. Цилиндрические экраны при промышленной частоте помехонесущего электромагнитного поля // Изв. АН СССР, энергетика и транспорт. – 1975. – № 4. – С. 66–74. 4. Каден Г. Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. – М.; Л., 1957. – 327 с. 5. Кравченко А.Н., Нижник Л.П. Электродинамические расчеты в электротехнике. – К., 1977. – 181 с. 6. Острейко В.Н. Расчет электромагнитных полей в многослойных средах. – Л., 1981. – 151 с. 7. Постников В.И., Остапчук Л.Б., Химюк И.В. Многослойные электромагнитные модели электрических машин. – К., 1988. – 200 с. 8. Титко А.И. Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. – К., 1994. – 351 с. 9. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М., 1976. – 616 с.