https://nure.ua/

The Ministry of Education and Science of Ukraine

Kharkiv National University of Radio Electronics

KITAM

2022

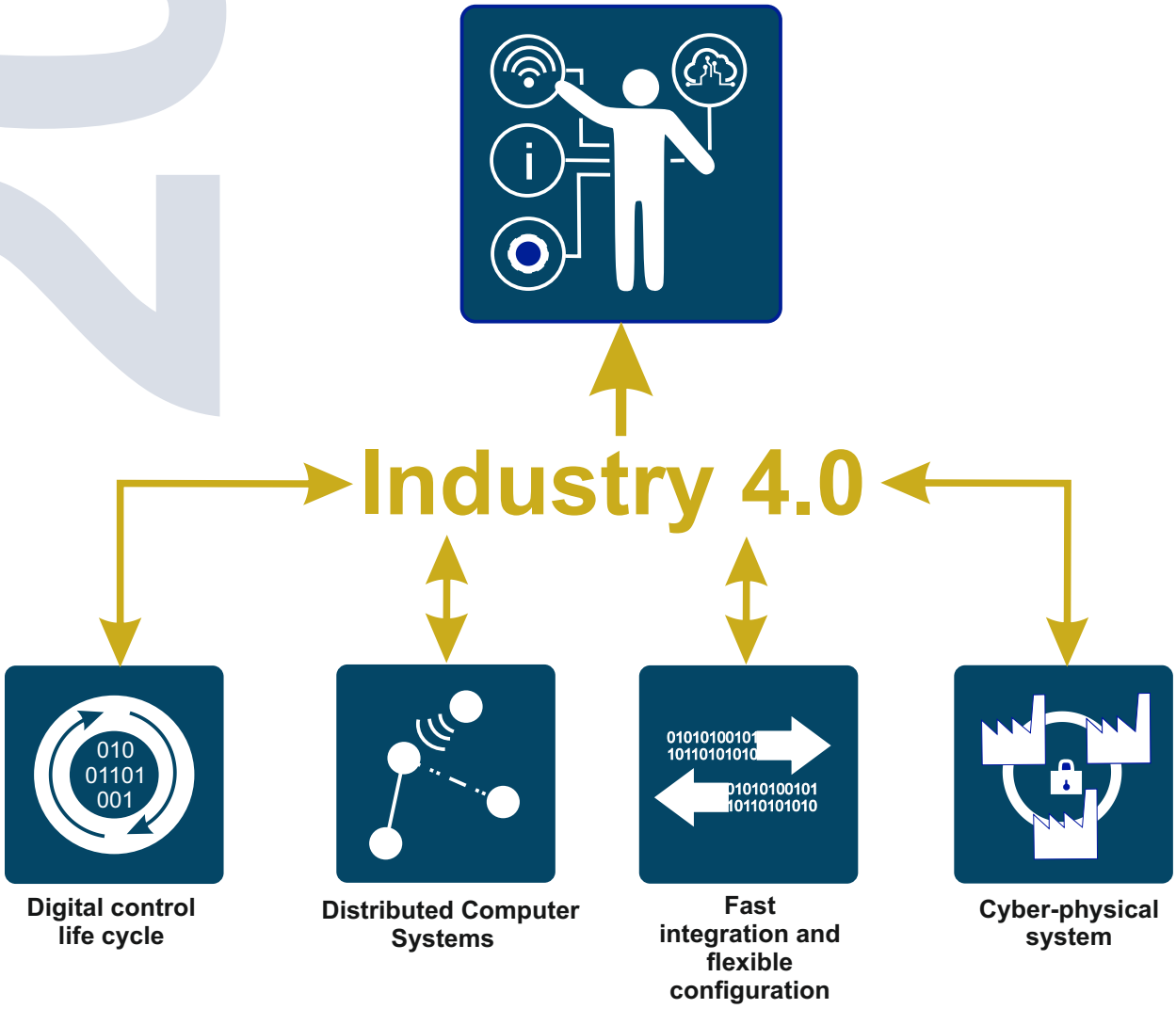
COLLECTION

OF STUDENTS' SCIENTIFIC PAPER

«Automation and Development of Electronic Devices»

ADED-2022

(Part 2)



https://nure.ua/

кафедра
Комп'ютерно-інтегрованих
технологій, автоматизації та мехатроніки

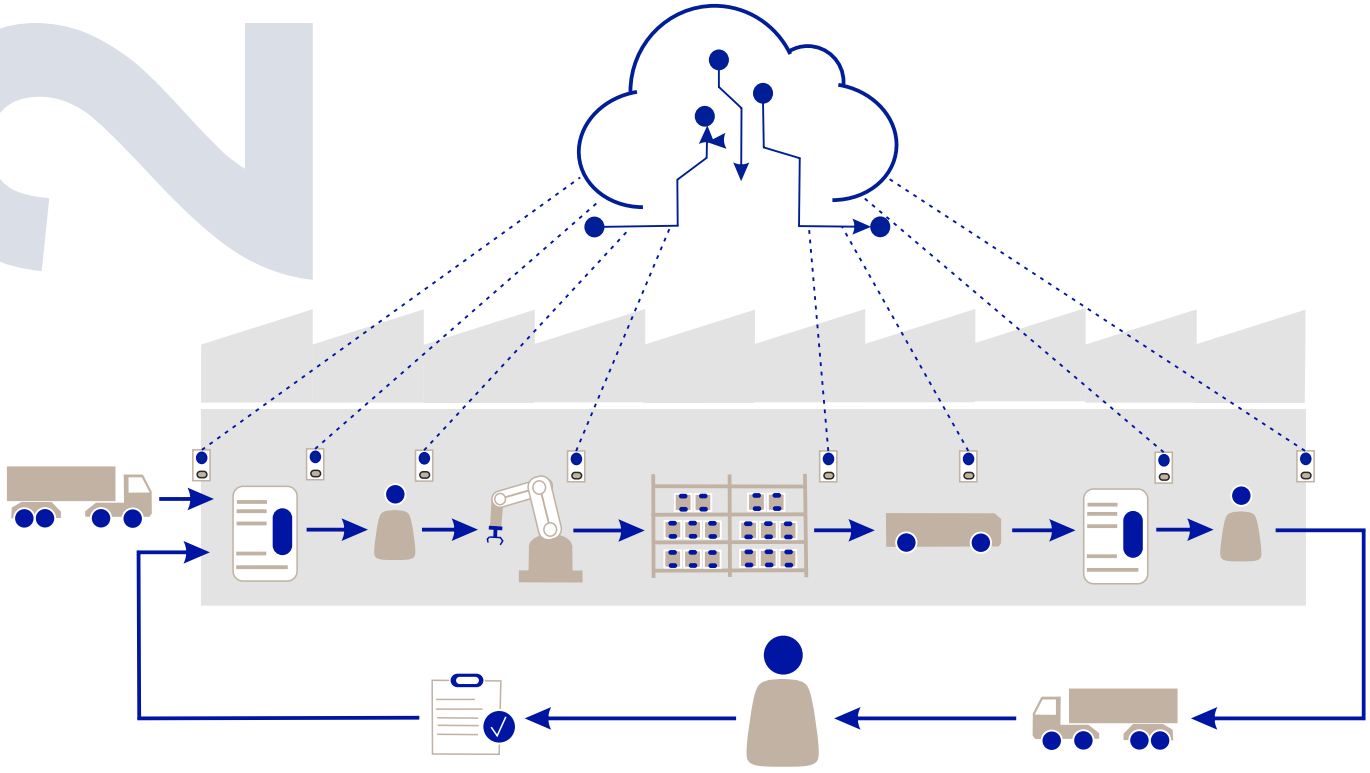
2022

ХНУРЕ

ЗБІРНИК

студентських наукових статей

«Автоматизація та приладобудування»
ADED-2022
(Випуск 2)
[електронне видання]



Industry 4.0

УДК 538.69

МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ МАГНІТНИХ ЕКРАНІВ

Сахаров М.С.
Харківський національний університет радіоелектроніки
Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14
E-mail: maksym.sakharov@nure.ua

Анотація: Розроблено математичну модель розрахунку коефіцієнта екранування багатошарового магнітного екрана, що враховує кількість шарів, властивості матеріалів та геометричні особливості конструкції екрана. Проведено комп'ютерне моделювання різних варіантів виконання багатошарових магнітних екранів, що дозволило дослідити вплив різних параметрів на показник ефективності екранування.

Ключові слова: магнітна проникність, екранування, багатошаровий екран, ефективність екранування.

MODELING OF MULTILAYER MAGNETIC SCREENS

Sakharov M.S.
Kharkiv National University of radio electronics
Ukraine, 61166, Kharkiv, 14 Nauki Ave.
E-mail: maksym.sakharov@nure.ua

Annotation: A mathematical model for calculating the shielding coefficient of a multilayer magnetic screen has been developed, taking into account the number of layers, material properties and geometric features of the screen design. Computer modeling of various versions of multi-layer magnetic screens was carried out, which allowed to investigate the influence of various parameters on the indicator of shielding efficiency.

Key words: magnetic permeability, shielding, multilayer screen, shielding efficiency.

ВСТУП. Забезпечення електромагнітної сумісності радіоелектронних засобів (РЕЗ), тобто досягнення такого стану, коли електротехнічні, електронні та радіоелектронні апарати, системи та установки будуть придатні до виконання функцій за призначенням при впливі завад, створюваних електротехнічними виробами та викликаних природними явищами, стало необхідною умовою науково-технічного прогресу, а отже, і сталого розвитку економіки, суспільства та держави.

Сучасною тенденцією стало посилення вимог до електромагнітної сумісності (ЕМС) і поширення регулювання в цій галузі на технічні засоби всіх видів та призначень, схильних до впливу електромагнітних завад і є їх джерелами. Підвищення швидкодії обчислювальної техніки, мініатюризація елементної бази призвели до появи багатьох електричних пристроїв, рівні сигналів яких вимірюються в мікроамперах і мікровольтах і нижче, а частоти сигналів можуть досягати гігагерц. За таких частот різко зросли випромінювання електромагнітних полів звичайних провідників у зовнішній простір і, як результат, наведення завад у сусідніх електричних елементах, порівнянних з корисними сигналами. Це негативно впливає на працездатність близько розташованих технічних засобів.

Необхідність цих змін була викликана тим, що у всі галузі економіки та різні сфери життя суспільства зростаючими темпами стали впроваджуватися мікроелектроніка, обладнання інформаційних технологій та засоби радіозв'язку, що мають підвищену сприйнятливість до електромагнітних завад. Особливе значення ЕМС має при розробці та виготовленні комп'ютерно-інтегрованих систем автоматики.

Метою роботи є дослідження методу магнітного багатошарового екранування як пріоритетного методу вирішення задачі підвищення магнітної стійкості та сумісності радіоелектронних засобів.

МОДЕЛЬ БАГАТОШАРОВОГО МАГНІТНОГО ЕКРАНУ. Розглянемо моделі багатошарових сферичних екранів. Якщо об'єкт розташувати в екрані, що складається з декількох феромагнітних шарів, розділених немагнітними проміжками, екранування об'єкта покращується.

Задача обчислення коефіцієнта екранування багатошарової структури ускладнюється зі збільшенням кількості шарів, внаслідок додавання нових граничних умов.

Схематично багатошаровий екран можна подати у вигляді рис. 1, де μ_0 – магнітна проникність немагнітного матеріалу (приблизно дорівнює 1), μ_M – магнітна проникність M-го шару, t_M – товщина M-го шару.

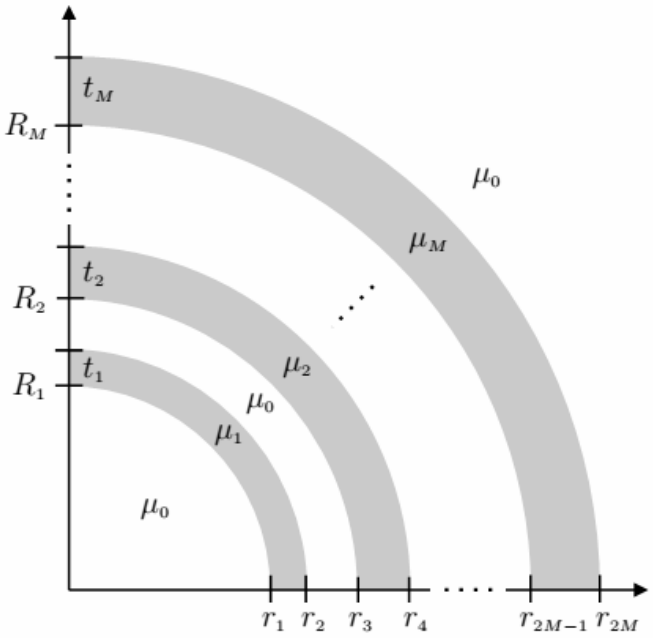


Рисунок 1 – Схематичний ескіз перерізу багатошарового електромагнітного екрану

Як матеріал немагнітного шару краще використовувати мідь (Cu) або благородні метали золото, срібло (Ag, Au).

Для подальшого теоретичного обґрунтування введемо додатковий коефіцієнт

$$\nu_{ij=}1-\left(R_i \big/ R_j\right)^3,$$

де R_i і R_j – чергові радіуси оболонок екрану починаючи з внутрішнього – нульового.

Для одношарового сферичного екрану вираз розрахунку коефіцієнта екранування запишеться як

$$K_1 = 1+\frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2\nu_{01}.$$

Вираз для двошарового екрану

$$K_2 = 1+\frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2\left(\nu_{01}+\nu_{23}-\nu_{01}\nu_{23}+\nu_{01}\nu_{12}\nu_{23}\right)+\left[\frac{2}{9\mu}(\mu-1)^2\right]^2\nu_{01}\nu_{12}\nu_{23},$$

для тришарового

$$K_3 = 1 + \frac{2}{9\mu}(\mu - 1)^2 (\nu_{01} + \nu_{23} + \nu_{45} - \nu_{01}\nu_{23} - \nu_{23}\nu_{45} - \nu_{45}\nu_{01} +$$

$$+ \nu_{01}\nu_{12}\nu_{23} + \nu_{23}\nu_{34}\nu_{45} + \nu_{01}\nu_{14}\nu_{45}) + \left[\frac{2}{9\mu}(\mu - 1)^2\right]^2 \times$$

$$\times (\nu_{01}\nu_{12}\nu_{23} + \nu_{23}\nu_{34}\nu_{45} + \nu_{01}\nu_{14}\nu_{45} - \nu_{01}\nu_{23}\nu_{45} + \nu_{01}\nu_{12}\nu_{23}\nu_{34}\nu_{45}) +$$

$$+ \left[\frac{2}{9\mu}(\mu - 1)^2\right]^3 \nu_{01}\nu_{12}\nu_{23}\nu_{34}\nu_{45}.$$

У загальному вигляді для розрахунку коефіцієнта екранування багатошарового екрану з *n*-шарами можна записати вираз

$$K_{общ} = 1 + \sum_{i=1}^{n} K_i + \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j>i}^{n} K_i \cdot K_j \cdot \left(1 - \left(R_i \Big/ R_j\right)^2\right) + K_n \prod_{i=1}^{n-1} K_i \cdot \left(1 - \left(R_i \Big/ R_{i+1}\right)^2\right), \quad (1)$$

де K_i – коефіцієнт екранування *i*-го екрана (2);

R_i і R_i – відповідно радіус *i*-го та *j*-го шарів;

n – кількість шарів екрана.

$$K_i = \frac{\mu_i \cdot t_i}{R_i}. \quad (2)$$

Проведемо комп'ютерне моделювання даної моделі з різними вхідними даними та порівняємо результати з опублікованими результатами експериментальних досліджень відповідних структур багатошарових магнітних екранів [1-2].

ВИБІР ЧИСЛА ШАРІВ БАГАТОШАРОВОГО СФЕРИЧНОГО ЕКРАНУ. Критерій доцільності переходу від одношарового екранування до багатошарового заснований на виразі

$$t \geq \frac{3R}{2\mu}.$$

Суть у цьому, що застосування одношарового екрану як порожнистої сфери стає нерентабельним, якщо не виконується вираз.

Критерій вибору числа шарів багатошарового екрану полягає у встановленні виграшу у коефіцієнті екранування при переході від використання *n* шарів до використання (*n* +1) шарів

$$\frac{K_{n+1}}{K_n} = 2\mu \cdot d^2 \frac{n^{2n-1}}{(n+1)^{2n+1}},$$

де *d* – сумарна товщина стінок;

n – кількість шарів.

Цей критерій можна записати в іншому вигляді

$$(n+1)^{2n+1} = 2\mu \cdot d^2 \cdot n^{2n-1}.$$

Тоді

$$d = \sqrt{\frac{(n+1)^{2n+1}}{2\mu \cdot n^{2n-1}}}.$$

Користуючись цим виразом неважко вибрати оптимальну кількість шарів екрану, виходячи з поставленої конкретної задачі.

РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ. Розроблену модель багатошарового магнітного екрану (1) реалізуємо у програмному коді. Для простоти обчислень та візуалізації результатів програмна реалізація виконана у програмному пакеті

для математичного моделювання MatLab . Фрагменти програмного коду та схематичне пояснення реалізації елементів моделі наведено на рис. 2.

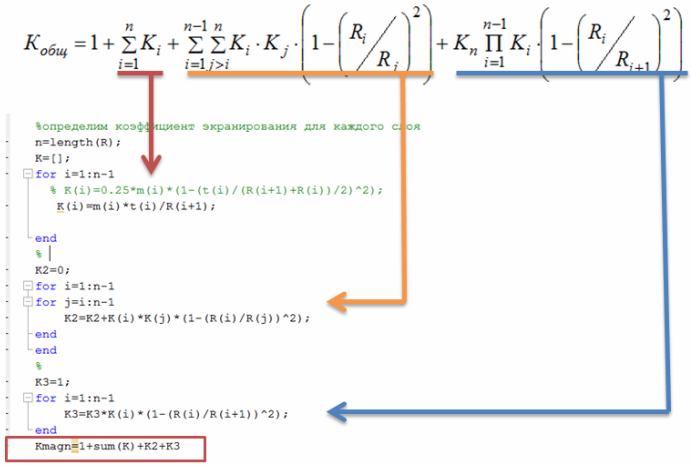


Рисунок 2 – Фрагмент комп'ютерної реалізації моделі

Вхідною інформацією для цієї моделі є:

– вектор значення товщин шарів (t);

– вектор значень показників магнітної проникності шарів (m);

– значення внутрішнього радіусу екрана (R).

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕАЛІЗОВАНОЇ МОДЕЛІ. Для забезпечення високої ефективності екранування електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот слід застосовувати багатошаровий плівковий екран (БПЕ). Найбільш перспективним із практичної точки зору способом формування БПЕ є метод електролітичного осадження. Він забезпечує високу технологічність процесу формування та жорстку фіксацію БПЕ щодо корпусу деталі, дозволяє варіювати в широких діапазонах кількість та товщину окремих шарів.

Використовуючи дані натурного експерименту [4], перевіримо адекватність побудованої математичної моделі для розрахунку коефіцієнта екранування багатошарового магнітного екрану. Для цього проведемо чисельне моделювання представлених у [4] варіантів структур екранів та порівняємо з експериментально виміряним коефіцієнтом екранування. Результати порівняльного аналізу представлені у табл. 1.

Таблиця 1 – Багатошаровий електромагнітний екран для захисту фотоелектронних помножувачів та спосіб його нанесення

Властивості	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ρ, мкОм·см	8,0	7,5	6,8	6,5	6,4	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	7,2	7,2	6,8
μ, $\times 10^5$	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	1,8	2,4	3,0	3,0	2,8	2,8	2,5	2,5	3,0
$d_{немагн}$, мкм	0,8	1,0	20,0	25,0	30,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	4,0	4,0	20,0
$\Sigma d_{магн}$, мкм	200,0	200,0	200,0	200,0	200,0	120,0	150,0	300,0	350,0	200,0	200,0	200,0	240,0	250,0
$\Sigma d_{екрану}$, мкм	207,2	209,0	80,0	425,0	470,0	300,0	330,0	480,0	530,0	220,0	220,0	396,0	476,0	430,0
$N_{магн} / N_{немагн}$	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	10/9	1/1	2/1	50/49	60/59	10/9
$K_{заг\ експ}$	16	20	70	72	73	12	25	100	100	12	22	65	74	100
$K_{заг\ розрах}$	18,1	21,05	70,25	72,1	73,39	11,87	24,9	101,5	102,1	12,05	22,14	64,134	77,1	101,3

З табл. 1 видно, що результати запропонованої моделі для розрахунку коефіцієнта екранування багатошарового магнітного екрана близькі до експериментальних даних.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ВИКОНАННЯ БАГАТОШАРОВИХ МАГНІТНИХ ЕКРАНІВ. Проведемо комп'ютерне моделювання під час варіювання різних параметрів багатошарових магнітних екранів[5-8]. Розглянемо приклад багатошаровії структури з NiFe/Cu. Приймемо в якості параметра, що варіюється, товщину магнітного шару ($d_{манг.}$) і кількість шарів, при цьому товщина немагнітного шару ($d_{немагн.}$) постійна (табл. 2, рис. 3).

Таблиця 2 – Розрахункові дані при $d_{немагн.}$ = 20 мкм

№	Параметри екрану	10	20	30	60	№ графіка
1	$d_{манг.}$ = 5 мкм	16	32	48	100,13	рис. 3, поз. 1
2	$d_{манг.}$ = 10 мкм	63,9	129,8	201	480,45	рис. 3, поз. 2
3	$d_{манг.}$ = 50 мкм	164	369,4	659,5	2456,4	рис. 3, поз. 3
4	$d_{манг.}$ = 150 мкм	617,9	2158,5	5532,8	35532	рис. 3, поз. 4

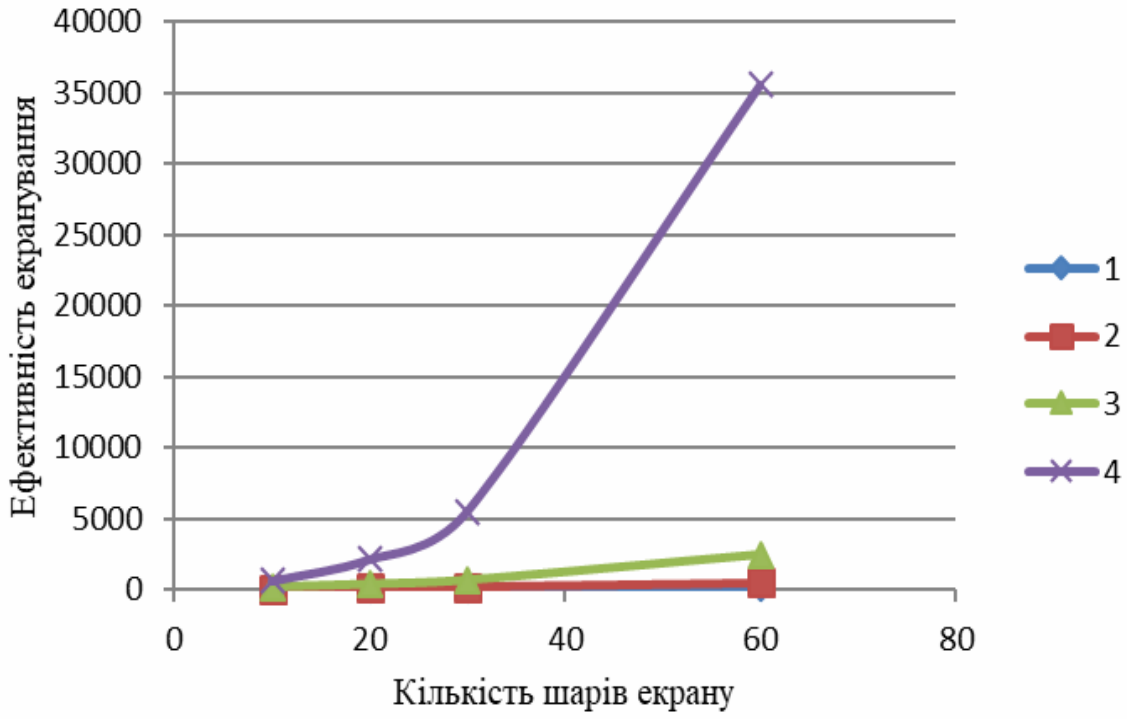


Рисунок 3 – Залежність ефективності екранування при зміні товщини магнітного шару та кількості шарів

Бачимо, що зі збільшенням товщини шару значна різниця в коефіцієнті екранування спостерігається при збільшенні кількості шарів. Зауважимо, що з товщині екрана 8,5 мм коефіцієнт екранування дорівнює 35532 одиниці, чи перерахунки на дБ – 91 дБ.

Проведемо моделювання ситуації, коли товщина магнітного шару стала. Результати моделювання наведено в табл. 3 та на рис. 4.

Таблиця 3 – Розрахункові дані при $d_{магн.}$ = 5 мкм

№	Параметри екрану	10	20	30	60	№ графіка
1	$d_{неманг.}$ = 20 мкм	16	32	48	100,13	рис. 4, поз. 1
2	$d_{неманг.}$ = 50 мкм	16,67	32,67	49,32	106,54	рис. 4, поз. 2
3	$d_{неманг.}$ = 100 мкм	17,08	36,06	60,81	196,27	рис. 4, поз. 3
4	$d_{неманг.}$ = 1000 мкм	17,52	39,67	72,75	283,24	рис. 4, поз. 4

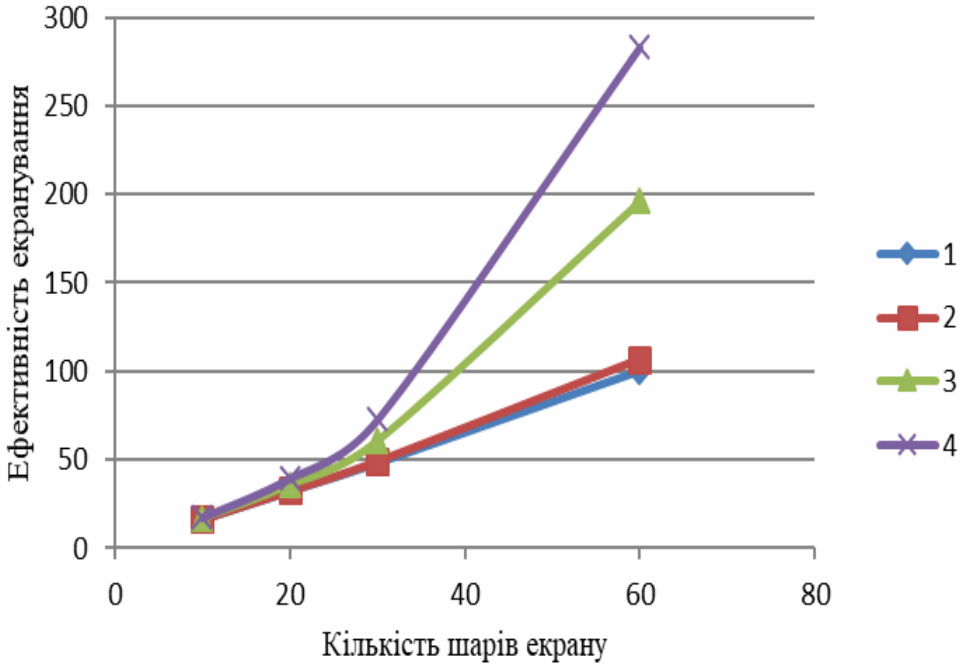


Рисунок 4 – Залежність ефективності екранування при зміні товщини немагнітного шару та кількості шарів

Бачимо, що товщина немагнітного шару трохи впливає на показник ефективності екранування, що логічно з властивостей немагнітного матеріалу.

У проведеному моделюванні розглядалися симетричні структури багатошарових екранів, з використанням моделі (1) та розробленого програмного забезпечення[9-15].

ВИСНОВКИ. Застосування багатошарових екранів при виготовленні виробів радіоелектронної промисловості підвищує технологічність, мінімізує габаритні та вагові характеристики при високих захисних властивостях, що забезпечується за рахунок послідовно нанесених магнітних і немагнітних шарів (товщиною в межах 1-225 мкм) і сумарна товщина магнітних шарів становить 300-500 мкм.

Встановлено, що при малій кількості шарів складова ефекту екранування, визначена ослабленням електромагнітної хвилі за рахунок відбиття на межах розділу між шарами, знижується. На ефективність екранування в багатошарових магнітних екранах значно впливає кількість шарів, товщина магнітного шару і матеріал магнітного шару. Товщина немагнітного шару незначно впливає на показник ефективності екранування, що логічно з властивостей немагнітного матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грабчиков С.С. Защита радиоэлектронной аппаратуры с помощью многослойных поверхностно-объемных экранов (МПОЭ) [Електронний ресурс] / Режим доступа: http://www.test-expert.ru/news/detail.php?ID=567.

2. Analytical models for magnetic shield design [Електронний ресурс] / Режим доступа: http://ftp.aip.org/epaps///rev_sci_instrum/E-RSINAK-83-014206/weldedMagneticShielding Supplementary.pdf.

3. Кечиев Л.Н., Акбашев Б.Б., Степанов П.В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. М.: ООО "Группа ИДТ", 2010. 470 с.

4. Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения [Електронний ресурс] / Режим доступа: http://www.findpatent.ru/patent/247/2474890.html.

5. Attar, H., & et al.. (2022). Control System Development and Implementation of a CNC Laser Engraver for Environmental Use with Remote Imaging. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Article ID 9140156, https://doi.org/10.1155/2022/9140156.

6. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.

7. Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., & Starodubcev, N. . (2022). A ROBOTIC PROSTHETIC A CONTROL SYSTEM AND A STRUCTURAL DIAGRAM DEVELOPMENT. Collection of Scientific Papers «ΛΌГОΣ», (August 12, 2022; Zurich, Switzerland), 113–114. https://doi.org/10.36074/logos-12.08.2022.33

8. Nevliudov, I., Razumov-Fryziuk, I., Yevsieiev, V., Nikitin, D., Blyzniuk, D., & Strelets, R. (2022). Cost estimation of photopolymer resin for 3D exposure of circuit boards. Technology Audit and Production Reserves, 2(2(64), 43–49. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538

9. Yevsieiev V., Maksymova S., Starodubcev N. Software Implementation Concept Development for the Mobile Robot Control System on ESP-32CAM // Current issues of science, prospects and challenges: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the II International Scientific and Theoretical Conference (Vol. 2), June 10, 2022. Sydney, Australia: European Scientific Platform., 2022. P. 54-56.

10. Automation of Flexible HMI Interface Development for Cyber-Physical Production Systems / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, N. Starodubcev, N. Demska // International periodic scien-tific journal SWorldJournal. – Issue No9, Part 1. – 2021. – P. 11-27.

11. Невлюдов, И., Стародубцев, Н., Евсеев, В., & Демская, Н. (2021). AUTOMATION OF FLEXIBLE HMI INTERFACE DEVELOPMENT FOR CYBER-PHYSICAL PRODUCTION SYSTEMS. SWorldJournal, 1(09-01), 11–27. https://doi.org/10.30888/2663-5712.2021-09-01-009

12. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Yevsieiev, V., Amer, A., Demska, N., Luhach, A. K., & Lyashenko, V. (2022). Electronic User Authentication Key for Access to HMI/SCADA via Unsecured Internet Networks. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Article ID 5866922. https://doi.org/10.1155/2022/5866922.

13. Khalid, M. S., Yevsieiev, V., Nevliudov, I. S., Lyashenko, V., & Wahid, R. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. International Journal of Engineering Trends and Technology, 70.1, 139-145.

14. Nevliudov, I., & et al.. (2021). GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive CyberDesign CPPS Development. Advances in Dynamical Systems and Applications, 16(2), 441-455.

15. Nevliudov, I., & et al.. (2020). Method of Algorithms for Cyber-Physical Production Systems Functioning Synthesis. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8(10), 7465-7473.