

ПАВЛЕНКО ЄВГЕН

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-0451-3861>e-mail: [sl1mvsshady@gmail.com](mailto:sl1mvsshady@gmail.com)

СТЕПАНОВ МИХАЙЛО

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-6376-4268>e-mail: [2m.stepanov@gmail.com](mailto:2m.stepanov@gmail.com)

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ЕКРАНУВАННЯ ЯК СПОСІБ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ ВІД ВИТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ ТЕХНІЧНИМИ КАНАЛАМИ

В даній роботі був досліджений один із таких способів захисту інформації від її витоків технічними каналами, як екранування. В першій частині роботи були розглянуті теоретичні засади екранування: визначення та процес екранування, його види, головне завдання екрану, висвітлено поняття ефективності екранування, представлена залежність для розрахунку ефективності електромагнітного екрану, зроблена класифікація екранів за трьома ознаками: типу поля завади, матеріалу і конструкції, форми екрану, для кожної форми представлена залежність для розрахунку ефективності екранування магнітного та електромагнітного поля, представлена залежність для розрахунку глибини проникнення як величини, яка характеризує екрануючу дію матеріалу екрану.

В другій частині роботи були розглянуто окремі види екранування: екранування електричного поля, залежність для розрахунку його ефективності, представлені основні вимоги, що пред'являються до електричних екранів, розглянуто принципи екранування низькочастотних та високочастотних магнітних полів, залежності для розрахунку ефективності їх екранування, представлені основні вимоги для магнітостатичних екранів, розглянуто екранування електромагнітних полів, основні механізми захисту від електромагнітних завад, представлена залежність для розрахунку ефективності екранування електромагнітного поля.

В третій частині роботи розрахована ефективність екранування та глибина проникнення електромагнітного поля для магнітних та немагнітних матеріалів на заданих частотах при різній провідності та різних значеннях товщини стінок екрану, представлені графіки частотної залежності ефективності екранування при різних значеннях товщин екрану, показана частотна залежність глибини проникнення електромагнітного поля для різних матеріалів, зроблені висновки та рекомендації щодо вибору матеріалів для екранування на високих та низьких частотах, приведені деякі матеріали для екранування постійного магнітного поля та високочастотного електромагнітного поля.

Ключові слова: технічний захист інформації, екранування, електромагнітне поле, ефективність екранування, екрануючі матеріали.

PAVLENKO YEVHEN, STEPANOV MIKHAILO

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## ELECTROMAGNETIC SHIELDING AS A WAY OF PROTECTING INFORMATION FROM ITS LEAKAGE BY TECHNICAL CHANNELS

In this paper, investigated one of the ways of protecting information from its leakages through the technical channels, such as shielding. The first part of the work mainly consider the theoretical principles of shielding, such as definition and process of shielding, its types, main task of the shield, highlighted the concept of shielding efficiency, presented dependence for calculating the efficiency of electromagnetic shield, provided shields classification according to three characteristics: type of field interference, design and material, shield forms, for each of them presented dependence for calculating shielding efficiency of magnetic and electromagnetic field, presented dependence for calculating depth of penetration, as a value that characterizes shielding effect of shielding material.

The second part of work consider separate types of shielding such as shielding of the electric field, dependence for calculating its effectiveness, presented main requirements for electric shields, considered the principles of shielding for low-frequency and high-frequency magnetic fields, dependences for calculating its shielding efficiency, presented main requirements for magnetostatic shields, considered shielding of electromagnetic fields, provided main mechanisms of protection against electromagnetic interference, presented dependence for calculating shielding efficiency of electromagnetic field.

In the third part of the work calculated shielding efficiency and penetration depth of electromagnetic field for magnetic and non-magnetic materials at given frequencies with different conductivity and different thickness of shield walls, provided graphs of frequency dependence of shielding efficiency at different thickness of the shield walls, shown graph of frequency dependence of penetration depth for different materials, made conclusions and provided recommendations regarding selection of shielding materials at high and low frequencies, presented shielding materials for permanent magnetic field and high-frequency electromagnetic field.

Keywords: technical protection of information, shielding, electromagnetic field, shielding effectiveness, shielding materials.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Робота та функціонування технічних засобів обробки інформації (ТЗОІ) та зв'язку супроводжується появою різних технічних каналів витoku інформації. Одним із таких каналів являється електромагнітний канал, що виникає внаслідок електромагнітного випромінювання, яке поширюється у різних середовищах (повітря, струмопровідні конструкції, тощо). Для забезпечення вимог по електромагнітній безпеці об'єкта, що включає в себе протидію несанкціонованому доступу до інформації з використанням спеціальних

технічних засобів, використовується екранування електромагнітних хвиль. Актуальність розробки високоєфективних, широкосмугових, технологічних і зручних в експлуатації екрануючих і радіопоглинаючих матеріалів пояснюється постійною потребою в даних матеріалах при розробці і удосконаленні конструкцій радіоелектронних приладів, приладів захисту інформації і військової техніки.

### Аналіз досліджень та публікацій

В роботі [1] представлено методи підвищення ефективності електромагнітного екранування, запропонований метод підвищення ефективності електромагнітного екранування для забезпечення електромагнітної сумісності за допомогою технології комп'ютерного моделювання. В статті [2] представлено аналіз ефективності екранування для різних матеріалів в залежності від частоти. Проведений аналіз виконується окремо для електричного, магнітного та електромагнітного полів, показано, що матеріали не є еквівалентними для зменшення електромагнітних полів. В роботі [3] розглянута конструкція екрану для низькочастотного магнітного поля, а також вимірюється ефективність екранування сталевого екрануючого корпусу та двох різних екрануючих дверей для низькочастотних магнітних полів у ближній зоні. В дослідженні [4] пропонується ефективний метод розташування шарів матеріалів з високою проникністю для екранування магнітного поля. В статті [5] було проведено експериментальні випробування ефективності екранування циліндричного мідного екрану та екрану з плетеного дроту в діапазоні 10 кГц – 1 ГГц, представлена нова модель екрану з плетеного дроту, а в роботі [6] досліджується моделювання характеристик магнітного екранування циліндричних екранів з однією або двома щілинами для різних матеріалів (залізо, мідь і високотемпературні напівпровідники YBCO). В дослідженні [7] було проаналізовано екранування при використанні мідної фольги та запропоновано нову схему екранування, яка має хороший ефект при екрануванні електричного поля, але не впливає на магнітне поле.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є** забезпечення захисту інформації шляхом екранування електромагнітного випромінювання, а також аналіз ефективності екранів та їх матеріалів.

### Виклад основного матеріалу

Екрануванням називають локалізацію електромагнітної енергії у певному просторі за рахунок обмеження розповсюдження її усіма можливими способами. Даний процес характеризується розсіюванням, заломленням, відбиванням і поглинанням енергії електромагнітних полів. Розрізняють наступні види екранування:

- екранування електричного поля (поле в ближній зоні випромінювання від джерела еквівалентного електричному диполю)
- екранування магнітостатичного поля (поле в ближній зоні випромінювання від джерела, еквівалентного магнітному диполю – раміці зі струмом)
- екранування електромагнітного поля (поле в ближній і дальній зонах випромінювання від будь-яких інших електромагнітних джерел енергії)

При проектуванні екрануючих систем використовують теорію поля, при цьому вводять поняття «ефективність екранування» (EE), яке в подальшому використовують у якості основного критерія вибору екрануючих матеріалів і конструкцій екранів.

Головне завдання екрану – послаблення напруги електричного (E) або магнітного (H) полів. Екрануючу дію екрану зробленого із немагнітного матеріалу у змінному електромагнітному полі визначають струми, що наводяться у площині екрану, а також магнітне поле, збуджене даними струмами. При екрануванні всередині блоків РЕА (радіоелектронна апаратура) внаслідок відносно невеликих відстаней між джерелами та приймачами завади мова йде, здебільшого, про екранування електро- та магнітостатичних полів.

Найбільший вплив на працездатність вузлів РЕА вказує магнітна складова електромагнітного поля з індукцією В. Коли магнітне поле з частотою f перетинає замкнутий контур площею S, то в контурі виникає ЕРС (електрорушійна сила).

$$|U| = 2\pi f S |B| \quad (1)$$

Розрахована за формулою (1) напруга являється напругою завади для чутливих елементів пристрою.

Якщо,  $|U| \geq U_n$  і нема можливості зменшити площу контура S, тоді потрібен електромагнітний екран, ефективність якого:

$$EE = 20 \lg \left( \frac{|U|}{U_n} \right) \quad (2)$$

Де EE – ефективність електромагнітного екрану; U – ЕРС, що виникає у замкнутому контурі;  $U_n$  – напруга завади.

Загалом, електромагнітні екрани можна класифікувати за трьома ознаками: типу поля завади, конструктивній формі та матеріалу конструкції стінок екрану [8].

### Тип поля завади

По типу завади розглядають магнітостатичні, електричні та електромагнітні поля. Під завадою розуміють внутрішній або зовнішній вплив, в результаті якого відбувається спотворення інформації в процесі її обробки, перетворення, збереження або передачі. Область простору навколо умовного випромінювача електромагнітної завади розділяється на ближню ( $r \leq \lambda/2\pi$ ) і дальню ( $r > \lambda/2\pi$ ) зони, де  $r$  – відстань від випромінювача до екрана;  $\lambda$  – довжина хвилі завади.

#### Форма екрана

Форма екрана впливає на ефективність екранування через залежність від неї величини характеристичного опору середовища. До того ж, форма екрана впливає на значення частоти на якій відбувається різке збільшення магнітного і електричного поля всередині екрану, а значить на його резонансні властивості. Виділяють прямокутну, циліндричну і сферичну форми екранів. Ефективність екранування електромагнітного поля прямокутного, циліндричного і сферичного екранів виражається наступним приблизним співвідношенням:

$$EE_n = EE_{\epsilon} + 3,6\text{дБ} = EE_c + 9,6\text{дБ}$$

Де  $EE_n$  – ефективність екранування електромагнітного поля прямокутного екрану;  $EE_{\epsilon}$  – ефективність екранування електромагнітного поля циліндричного екрана;  $EE_c$  – ефективність екранування електромагнітного поля сферичного екрана.

Найкраще співвідношення хвильових опорів простору і екрана має плоска хвиля, внаслідок чого виникає більше відбивання хвилі. Дана обставина обумовлює перевагу циліндричного екрану по відношенню до сферичного і, в свою чергу, прямокутного по відношенню до обох даних конструкцій.

Зворотна закономірність справедлива і для магнітних екранів. В даному випадку, має місце наступна залежність між ефективністю затухання прямокутного, циліндричного і сферичного екранів:

$$EE_n = EE_{\epsilon} + 3,6\text{дБ} = EE_c + 9,6\text{дБ}$$

Цьому є і фізичне пояснення. Дія магнітостатичних екранів відбувається по принципу замикання магнітного потоку в магнітній масі екрана. Екрануючий ефект зростає зі зменшенням опору екрана даному потоку. В порівнянні з прямокутним екраном, більш точно даній вимозі відповідає конструкція у вигляді шара або циліндра.

#### Матеріал і конструкція екрану

Матеріал стінки екрану найбільш впливає на ефективність екранування. За матеріалом і конструкцією стінок виділяють магнітні та немагнітні метали, а також фольговані, сіткові, радіопоглинаючі матеріали та багатошарові екрани. Величиною, що характеризує екрануючу дію матеріалу екрана являється глибина проникнення  $\delta$  (на такій глибині напруга електричного поля зменшується в  $e$  разів) [9]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}$$

Де  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота;  $f$  – частота, Гц;  $\sigma$  – провідність,  $\text{См} \cdot \text{см}^{-3}$ ;  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ;

$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \text{ Г} \cdot \text{см}^{-1}$  – магнітна стала;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність

Якщо екран працює в магнітному полі ближньої зони, ефективність екранування для магнітних матеріалів у порівнянні з немагнітними значно вище, так як  $\mu_r \gg 1$ . В електромагнітному полі дальньої зони, немагнітні матеріали, внаслідок їх більшої провідності являються більш ефективнішими, ніж магнітні.

Теоретично, вирішення задачі екранування, визначення значень напруги полів надзвичайно важко, тому відштовхуючись від конкретної задачі доцільно розглядати його окремі види: електромагнітне, магнітостатичне та електричне.

#### Екранування електричних полів

Електрична складова електромагнітного поля має місце в ближній зоні випромінювання при протіканні малих струмів та при великих напругах функціональних вузлів ТЗОІ, яка розглядається як зв'язок через малу паразитну ємність  $C_{\text{св}}$  між джерелами та приймачами наведень, ефективність її екранування визначається наступним співвідношенням [10]:

$$A = 20 \lg \frac{U_p}{U_{p.з}} = 20 \lg \frac{C_{\text{св}}}{C'_{\text{св}}}$$

Таким чином, знижуючи  $C_{\text{св}}$  тим самим збільшуємо і  $EE$ .

Розглянемо основні рекомендації, стосовно використання електричних екранів:

1. Замикання силових ліній електричного поля не повинно виходити за межі конструкції екрану.
2. При роботі на низьких частотах, ключове значення з точки зору  $EE$  має якість контакту екрану та корпусу пристрою, товщина екрана та його матеріалу практично не мають значення.

3. При роботі на високих частотах, в режимі електромагнітного поля, ключове значення з точки зору ЕЕ мають властивості матеріалу екрану (магнітна проникність, електрична провідність) та його товщина.

#### Екранування низькочастотних магнітних полів (магнітостатичне екранування)

Екрани виготовляють із феромагнітних матеріалів (наприклад, пермалой або сталь), що мають велику відносну магнітну проникність  $\mu_r$ . Внаслідок значної розбіжності між  $\mu_r$  екрану та  $\mu_r$  внутрішнього середовища, силові лінії магнітного поля будуть проходити вздовж стінок екрану, котрі мають значно менший опір ніж опір повітря. ЕЕ магнітного поля залежить від  $\mu_r$  екрану (опір магнітопроводу) та його товщини і визначається наступним виразом:

$$A = 20 \lg \left( \frac{\mu S_1 + S_2}{S} \right)$$

Де  $\mu$  – відносна магнітна проникність матеріала екрана;

$$S = S_1 + S_2$$

Даний вид екранування застосовується при подавленні наведень в діапазоні частот 1–10 кГц. Розглянемо основні рекомендації, щодо використання магнітостатичного екрану:

1. Матеріал екрану повинен мати високе значення  $\mu_r$ .
2. Чим більше значення товщини екрану тим більша ефективність його екранування.
3. Ефективність екранування низькочастотних магнітних полів від заземлення не залежить.

#### Екранування високочастотних магнітних полів

Екранування магнітного поля обумовлено, в першу чергу, компенсацією даного поля магнітним полем вихрових струмів, а також послабленням магнітного поля при проникненні в глибину матеріалу стінок екрана. Чим вище частота магнітного поля, тим менша глибина проникнення. До тих пір поки товщина стінок екрана менше глибини проникнення (для низьких частот), основну роль грає компенсація поля. Зі збільшенням частоти, коли товщина стінок екрана стає більше глибини проникнення, вирішальним фактором може стати ослаблення поля при проникненні його в товщину стінок екрана. Так як з ростом частоти магнітного поля глибина проникнення зменшується, то зменшується і магнітопровідність екрана, яка залежить від габаритних розмірів і магнітної проникності матеріалу екрана. В даних умовах, в наслідок суттєвого зменшення еквівалентної товщини стінок екрана, не проявляється явище шунтування магнітного поля. Тому, для забезпечення екранування на високих частотах, в якості матеріалу екранів часто застосовують немагнітні матеріали [10].

Ефективність екранування магнітних полів на високих частотах визначається втратами викликаними вихровими струмами в матеріалі екрана за рахунок їх поглинання, відбивання або компенсації. Під дією високочастотного магнітного поля, діють два фактори викликані вихровими струмами: зворотне поле екрана та поверхневий ефект його матеріалу. При відносно великому значенні товщині матеріалу екрана, при  $\delta_{\text{екр}} > \delta$  діють обидва фактори і ЕЕ можна визначити за приблизною залежністю:

$$E \approx e^{\delta_{\text{екр}}/\delta} \left( \frac{1}{2} + \frac{D}{2,8t\mu\delta} \right)$$

На низьких частотах, при  $\delta_{\text{екр}} < \delta$ , спостерігається незначений поверхневий ефект і діє тільки перший фактор, ефективність розраховують за допомогою наступного рівняння:

$$E \approx \sqrt{1 + \left( \frac{\omega\mu_0\sigma D\delta_{\text{екр}}^2}{2t} \right)}$$

#### Екранування електромагнітних полів

Слід відрізнити екранування електромагнітних полів від магнітного екранування, яке відносять до екранування магнітних полів на низьких частотах (наприклад, 60 Гц). Матеріали для екрана для електромагнітних полів відрізняються від магнітних. Екранування відбувається завдяки відбиванню електромагнітної хвилі від металевої поверхні екрана і подальшому заломленню заганеної хвилі у тілі екрана. Основним механізмом захисту від електромагнітних завад являється відбивання. Відбивання обумовлюється невідповідністю електромагнітного середовища, в якому розповсюджується електромагнітна енергія з матеріалом екрана. На рисунку 1, показаний загальний механізм захисту від ЕМП (електромагнітного поля) за допомогою плоского екрану:

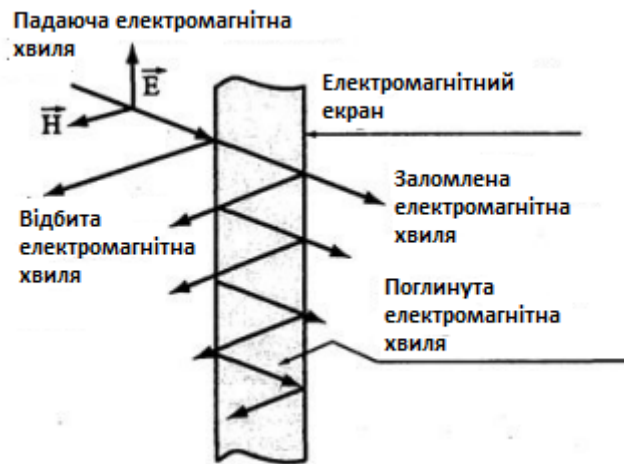


Рис. 1. Екранування ЕМП плоским екраном

Загалом, взаємодію електромагнітної хвилі з екраном можна представити наступним чином: відбиття хвилі від поверхні екрану, часткове проникнення хвилі в стінку екрану з її подальшим поглинанням матеріалом екрану за рахунок багатократного відбивання від його стінок в результаті відбувається часткове проникнення хвилі в область екранування. Якщо втрата енергії хвилі в екрані, тобто її поглинання, перевищує 10 дБ, то хвилями, що пройшли за екран після внутрішніх відбивань можна знехтувати (практичне значення мають тільки два перші відбивання) [11].

Металеві екрани відрізняються високою ефективністю роботи на радіочастотах, які збільшуються при збільшенні частоти електромагнітного випромінювання, що падає, однак вони мають один істотний недолік, пов'язаний з їх високою електропровідністю: високим коефіцієнтом відбиття, зумовленим великою відмінністю хвильового опору вільного простору та екрану.

Іншим механізмом захисту від електромагнітних завад являється поглинання. Для значного поглинання випромінювання екран повинен мати електричні та/або магнітні диполі, що взаємодіють із електромагнітними полями у випромінюванні. Такі диполі можуть бути представлені матеріалами, що мають високу діелектричну проникність. Магнітні диполі можуть бути представлені матеріалами, що мають високе значення магнітної проникності. На низьких частотах ефективність екранування тим вища, чим вище значення магнітної проникності матеріалу екрану. Однак, з урахуванням того, що залежність втрат при поглинанні прямо пропорційна значенням товщини екрану та частоти електромагнітного поля, доводиться збільшувати товщину екрану. Зі зростанням частоти, магнітна проникність всіх матеріалів швидко зменшується при чому – чим більше значення магнітної проникності, тим значніше її зменшення. Тому, матеріали з великим значенням початкової магнітної проникності доцільно використовувати для частот близько 1 кГц. При більших значеннях напруженості магнітного поля через насичення матеріалу феромагнетика його магнітна проникність падає тим різкіше, чим більше початкове значення проникності. Електромагнітне випромінювання на високих частотах проникає лише поблизу поверхневої області електричного провідника. Об'ємна щільність струму максимальна біля поверхні провідника. При віддаленні від поверхні вона зменшується експоненційно і на глибині  $\delta$  стає менше в кілька разів. Дану глибину проникнення можна розрахувати за наступною формулою:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

Виходячи із вищесказаного, ефективність екранування електромагнітного поля може бути представлена формулою:

$$EE = E_{nad} / E_2 = H_{nad} / H_2 = e^{\frac{\delta_{exp}}{\delta}} Z_{c_{нов}} / 4Z_{c_{мет}}, \quad (4)$$

де  $Z_{c_{нов}} = 377 \text{ Ом}$  – характеристичний опір вакууму (і повітря), глибина проникнення розраховується за формулою (3), характеристичний опір матеріалу екрану розраховується за формулою:

$$Z_{c_{мет}} = \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{2\pi f \mu}{\sigma}} \quad (5)$$

Базуючись на формулах (3), (4), (5) розрахуємо EE (ефективність екранування) та глибину проникнення електромагнітного поля для магнітних та немагнітних матеріалів на заданих частотах при різній провідності та різних значеннях товщини стінок екрану:

Таблиця 1

Розрахунок ЕЕ та глибини проникнення електромагнітного поля для магнітних та немагнітних матеріалів на заданих частотах при різних значеннях провідності та товщини стінок екрану

$f$ , $\Gamma\text{ц}$	$\delta_{\text{екр}}$ , $\text{мм}$	ЕЕ									
		Алюміній		Латунь		Мідь		Сталь		Пермалой	
		$\sigma=38^*$ $10^4$ $\text{См}\cdot\text{СМ}^3$	$\mu_r=1$	$\sigma=16.6^*$ $10^4$ $\text{См}\cdot\text{СМ}^3$	$\mu_r=1$	$\sigma=59^*$ $10^4$ $\text{См}\cdot\text{СМ}^3$	$\mu_r=1$	$\sigma=10^*$ $10^4$ $\text{См}\cdot\text{СМ}^3$	$\mu_r=50$	$\sigma=1.54$ $\cdot 10^4$ $\text{См}\cdot\text{СМ}^3$	$\mu_r=8000$
$10^2$	0.03	146		143		148		124		94	
	0.3	147		143		148		125		99	
	1.0	147		143		150		127		113	
	2,0	148		144		151		131		132	
Глибина проникнення $\delta$ , мм		8.170		12.350		6.550		2.250		0.450	
$10^3$	0.03	136		133		138		114		85	
	0.3	137		133		139		117		102	
	1.0	140		135		142		126		144	
	2,0	143		137		147		138		204	
Глибина проникнення $\delta$ , мм		2.600		3.900		2.070		0.710		0.140	
$10^4$	0.03	127		123		128		105		79	
	0.3	130		125		132		115		131	
	1.0	137		130		141		142		265	
	2,0	148		137		155		181		456	
Глибина проникнення $\delta$ , мм		0.820		1.230		0.655		0.225		0.045	
$10^5$	0.03	117		113		119		97		82	
	0.3	126		119		131		130		245	
	1.0	150		135		160		216		669	
	2,0	184		157		202		338		1275	
Глибина проникнення $\delta$ , мм		0.260		0.390		0.207		0.071		0.014	
$10^6$	0.03	110		105		112		95		111	
	0.3	138		124		148		199		628	
	1.0	213		173		241		469		1968	
	2,0	319		243		373		855		3884	
Глибина проникнення $\delta$ , мм		0.082		0.124		0.066		0.023		0.004	
$10^7$	0.03	106		99		111		110		225	
	0.3	197		159		224		440		1860	
	1.0	433		315		517		1294		6099	
	2,0	769		537		936		2514		–	
Глибина проникнення $\delta$ , мм		0.026		0.039		0.021		0.007		0.001	
$10^8$	0.03	118		104		128		179		608	
	0.3	405		294		486		1221		5779	
	1.0	1150		786		1414		3922		–	
	2,0	2213		1489		2739		–		–	
Глибина проникнення $\delta$ , мм		0.008		0.012		0.006		0.002		0.0004	

Графіки частотних залежностей таблиці 1 при різних значеннях товщини екрану наведені в таблиці 2:

Таблиця 2

**Частотні залежності ЕЕ при різних значеннях товщин екрану**

$\delta_{\text{екр}}$	Низькі частоти	Високі частоти
0,03 мм		
0,3 мм		
1 мм		
2 мм		

Залежності глибини проникнення електромагнітного поля від частоти для матеріалів, які часто використовуються при виготовленні екранів, наведені на рисунку 2:

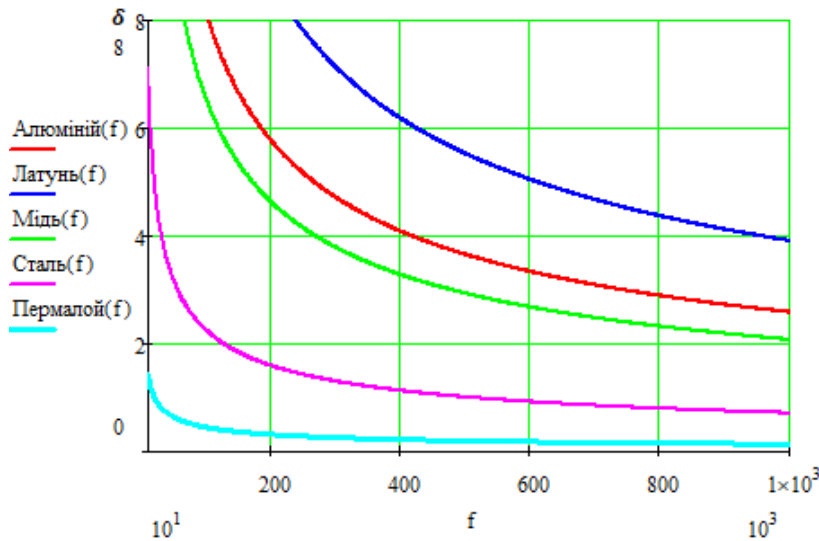


Рис. 2. Частотна залежність глибини проникнення електромагнітного поля для різних матеріалів

Таким чином, у випадку екранування на високих частотах, необхідно вибирати матеріали з високою провідністю, а на низьких – з високою проникністю. Для екранування постійного магнітного поля використовуються магнітно-м'які матеріали, такі як пермалой, альсифер, трансформаторна або електротехнічна сталь тощо. Для екранування високочастотного електромагнітного поля використовуються матеріали з високою провідністю: срібло, мідь, алюміній, латунь тощо. Ефективність екранування в найбільшій мірі залежить від стінок екрану. Крім того, метали і сплави з високою провідністю, за виключенням сталі, не підходять для екранування постійних магнітних полів, тому що мають магнітну проникність рівну одиниці (як у повітря). Також для того, щоб здійснювати ефективне екранування в широкому діапазоні частот краще використовувати багатошарові матеріали, наприклад сталь з нанесеним шаром провідного металу. Для отримання ще більшого коефіцієнта екранування можна застосовувати комбіновані багатошарові матеріали.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В ході проведеної роботи був досліджений один із основних методів пасивного захисту від витоків інформації технічними каналами – екранування.

1) В першій частині роботи були досліджені теоретичні засади екранування, поняття його ефективності та її залежності від типу завади, форми екрану та матеріалу його конструкції.

2) В другій частині роботи були досліджені основні положення і залежності екранування електричних, магнітних та електромагнітних екранів, розглянуті питання ефективності їх екранування. Представлені основні вимоги до електричних та магнітостатичних екранів.

3) В третій частині був проведений розрахунок ефективності екранування магнітних та немагнітних матеріалів на заданих частотах при різних значеннях провідності та товщини стінок екрану, представлені графіки частотних залежностей проведених розрахунків, а також графік частотної залежності глибини проникнення електромагнітних полів для різних матеріалів. На базі отриманих результатів, представлені відповідні висновки та рекомендації.

#### Література

1. Chien T. T., Minh Tu B. T. and Do T. N. Improvement of shielding for electromagnetic compatibility. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC), Danang, Vietnam, 2016, pp. 1-4, doi: 10.1109/ELINFOCOM.2016.7562954.
2. Saadi H. and Oussaid R. Materials Effect on Shielding Effectiveness. 2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications, Dubai, United Arab Emirates, 2007, pp. 999-1002, doi: 10.1109/ICSPC.2007.4728490.
3. Yichao Z., Cheng G., Lihua S. and Bihua Z. Analysis and Test of EM Shielding for Low-Frequency Magnetic Field. 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Qingdao, China, 2007, pp. 345-349, doi: 10.1109/ELMAGC.2007.4413501.
4. Lee S.-Y., Lim Y.-S., Choi I.-H., Lee D.-I. and Kim S.-B. Effective Combination of Soft Magnetic Materials for Magnetic Shielding. in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4550-4553, Nov. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2196682.



5. Guan Wang, Mang He, Tianwen Wang, Yanhui Guo, Xihong Ye and Xiaowen Xu. Simulation of the electric field Shielding Effectiveness in the range of 10kHz–1GHz. 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVE TECHNOLOGY & COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS, Qingdao, 2013, pp. 12–15, doi: 10.1109/ICMTCE.2013.6812470.
6. Zhang W., Zhu W., Luo T., Shen H. and Huang S. Research on Magnetic Shielding Effectiveness of Different Materials Hollow Cylinder with Slits. 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, 2018, pp. 365–370, doi: 10.1109/CIEEC.2018.8745967.
7. Qingbin Chen and Wei Chen. The new electric shielding scheme with comb-shaped wire and its applications in SMPS. 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Amsterdam, Netherlands, 2011, pp. 1–7, doi: 10.1109/INTLEC.2011.6099751.
8. Пігур Н. В. Показники та критерії оцінювання якості комплексної системи захисту інформації / Н. В. Пігур, В. Д. Погребенник // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування. – 2013. – № 774. – С. 86–91. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULP\\_2013\\_774\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULP_2013_774_16)
9. Касаткіна Н. В. Розрахункові методи проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями / Н. В. Касаткіна, О. М. Тихенко, О. М. Фурсенко // Системи упр., навігації та зв'язку. – 2020. – Вип. 2. – С. 118–121.
10. Основи конструювання обчислювальної техніки : навч. посіб. ч. 2 / А. П. Федоренко, С. В. Баловсяк ; Чернів. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2011. – 80 с.
11. Гнатів А. В. Фізичні основи екранування з погляду питань електромагнітної сумісності / А. В. Гнатів, Д. С. Шимук, А. О. Шевченко // Системи обробки інформації. – 2006. – Вип. 6. – С. 51–58. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi\\_2006\\_6\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_6_9).

### References

1. Chien T. T., Minh Tu B. T. and Do T. N. Improvement of shielding for electromagnetic compatibility. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC), Danang, Vietnam, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/ELINFOCOM.2016.7562954.
2. Saadi H. and Oussaid R. Materials Effect on Shielding Effectiveness. 2007 IEEE International Conference on Signal Processing and Communications, Dubai, United Arab Emirates, 2007, pp. 999–1002, doi: 10.1109/ICSPC.2007.4728490.
3. Yichao Z., Cheng G., Lihua S. and Bihua Z. Analysis and Test of EM Shielding for Low-Frequency Magnetic Field. 2007 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Qingdao, China, 2007, pp. 345–349, doi: 10.1109/ELMAGC.2007.4413501.
4. Lee S.-Y., Lim Y.-S., Choi I.-H., Lee D.-I. and Kim S.-B. Effective Combination of Soft Magnetic Materials for Magnetic Shielding. in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4550–4553, Nov. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2196682.
5. Guan Wang, Mang He, Tianwen Wang, Yanhui Guo, Xihong Ye and Xiaowen Xu. Simulation of the electric field Shielding Effectiveness in the range of 10kHz–1GHz. 2013 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROWAVE TECHNOLOGY & COMPUTATIONAL ELECTROMAGNETICS, Qingdao, 2013, pp. 12–15, doi: 10.1109/ICMTCE.2013.6812470.
6. Zhang W., Zhu W., Luo T., Shen H. and Huang S. Research on Magnetic Shielding Effectiveness of Different Materials Hollow Cylinder with Slits. 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, 2018, pp. 365–370, doi: 10.1109/CIEEC.2018.8745967.
7. Qingbin Chen and Wei Chen. The new electric shielding scheme with comb-shaped wire and its applications in SMPS. 2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), Amsterdam, Netherlands, 2011, pp. 1–7, doi: 10.1109/INTLEC.2011.6099751.
8. Пігур Н. В. Показники та критерії оцінювання якості комплексної системи захисту інформації / Н. В. Пігур, В. Д. Погребенник // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Автоматика, вимірювання та керування. – 2013. – № 774. – С. 86–91. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULP\\_2013\\_774\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULP_2013_774_16)
9. Касаткіна Н. В. Розрахункові методи проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями / Н. В. Касаткіна, О. М. Тихенко, О. М. Фурсенко // Системи упр., навігації та зв'язку. – 2020. – Вип. 2. – С. 118–121.
10. Основи конструювання обчислювальної техніки : навч. посіб. ч. 2 / А. П. Федоренко, С. В. Баловсяк ; Чернів. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2011. – 80 с.
11. Гнатів А. В. Фізичні основи екранування з погляду питань електромагнітної сумісності / А. В. Гнатів, Д. С. Шимук, А. О. Шевченко // Системи обробки інформації. – 2006. – Вип. 6. – С. 51–58. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi\\_2006\\_6\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2006_6_9).