

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra31.03.190>
УДК 535.42+535.44:535.211:535.341

М.Г. Кокодій, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1325-4563>

С.Л. Бердник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0037-6935>

А.В. Дегтярьов, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0844-4282>

М.М. Дубінін, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7723-9592>

В.О. Маслов, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7743-7006>

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

(ROR: <https://ror.org/03ftejk10>), Харків, Україна

E-mail: v.a.maslov@karazin.ua

МІКРОХВИЛЬОВЕ ПОГЛИНАННЯ В ТОНКИХ ПРОВІДНИКАХ СКІНЧЕНОЇ ДОВЖИНИ

Предмет і мета роботи. Існуючі розрахунки ефекту сильного поглинання електромагнітного випромінювання в провідниках, діаметр яких у кілька сотень разів менший за довжину хвилі випромінювання, засновані на фізиці взаємодії електромагнітної хвилі з нескінченно довгим провідником. Однак теорія антен показує, що резонансні явища в скінченних провідниках можуть значно посилювати або пригнічувати взаємодію провідників з електромагнітним випромінюванням. Предметом роботи є фізичні особливості взаємодії тонкого провідника скінченної довжини з плоскою лінійно поляризованою електромагнітною хвилею. Мета роботи полягає в дослідженні впливу довжини провідника на енергію, що поглинається.

Методи та методологія. Асимптотичним методом усереднення знаходиться розв'язок інтегрального рівняння для струму в тонкому імпедансному провіднику. Використовуючи закон Джоуля–Ленца та обчислюючи опір провідника, розраховується потужність, що поглинається провідником. Це дозволяє визначити фактор ефективності поглинання мікрохвильового випромінювання, що падає на провідник скінченної довжини.

Результати. Досліджено залежність поглинання енергії мікрохвильового випромінювання в тонкому провіднику від його довжини. Показано, що коли довжина провідника близька до половини довжини хвилі випромінювання та є її кратною, поглинання збільшується в кілька десятків разів у порівнянні з його значенням для нескінченно довгого провідника.

Висновки. Отримані результати уточнюють існуюче розуміння взаємодії мікрохвильового випромінювання з тонкими провідними елементами та можуть знайти застосування для розробки компактних навантажень, що поглинають, екранувальних елементів і компонентів передачі мікрохвильової енергії.

Ключові слова: мікрохвильове випромінювання, тонкі провідники, поглинання, резонанс, електромагнітна взаємодія

Вступ

Взаємодія електромагнітного випромінювання з тонкими провідними структурами залишається важливою темою в сучасній електродинаміці,

теорії антен і мікрохвильовій техніці, оскільки вона безпосередньо пов'язана з розсіянням, поглинанням, екрануванням і передачею електромагнітної енергії в тонких провідних об'єктах. Останніми роками ця проблема вивчалася з ви-

Цитування: Кокодій М.Г., Бердник С.Л., Дегтярьов А.В., Дубінін М.М., Маслов В.О. Мікрохвильове поглинання в тонких провідниках скінченної довжини. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2026. Т. 31. № 3. С.190—198. <https://doi.org/10.15407/rpra31.03.190>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

користанням кількох взаємодоповнюючих підходів. Моделі тонких провідників і моделі, що базуються на струмі, широко використовуються для подовжених провідників, оскільки вони забезпечують фізично прозорий опис індукованого струму та резонансної поведінки з відносно низькими обчислювальними витратами [1–5]. Їхня головна перевага — ефективність для дрітподібних структур, тоді як їхнє обмеження полягає в необхідності спрощених припущень щодо радіуса провідника, геометрії та розподілу струму. Більш суворі повнохвильові й аналітично регуляризовані формулювання є більш загальними і можуть описувати скінченні провідні циліндричні структури з більшою точністю, включаючи крайові та скінченні ефекти, але вони математично складніші й обчислювально більш ресурсомісткі [6, 7]. Сучасна обчислювальна електродинаміка також використовує чисельні методи загального призначення, такі як метод допоміжних джерел, які розширюють діапазон конфігурацій, що аналізуються. Однак ці підходи зазвичай призначено для розв’язання ширших задач розсіяння, а не для прямої оцінки резонансного поглинання в одиночному тонкому провіднику скінченної довжини [8].

Пов’язаний з цим напрям недавніх досліджень стосується електромагнітної взаємодії з провідними стрижнями, волокнами та перспективними поглинаючими структурами. Зокрема, досліджувалися резонансні ефекти в конфігураціях типу провідних стрижнів для мікрохвильових полів, включаючи подібні структури з діелектричним покриттям і поглинаючі метаматеріали на основі провідних волокон [9, 10]. Водночас активно розглядався широкий клас сучасних мікрохвильових поглинаючих матеріалів і поглинаючих структур з погляду механізмів згасання, розширення смути пропускання та підходів проектування [11, 12]. Ці дослідження важливі для додатків, але здебільшого їх зосереджено на матеріальних системах, метаматеріалах чи загальних структурах поглиначів, а не на дослідженні залежності чинника ефективності поглинання від довжини одиночного тонкого провідника.

Отже, хоча наявні в наш час підходи надають цінні інструменти для аналізу явищ розсіяння, резонансів і поглинання [1–12], проблема резонансного поглинання мікрохвильового випроміню-

вання тонким провідником скінченної довжини при збудженні плоскою хвилею, що падає нормально на його поверхню, залишається недостатньо з’ясованою. На відміну від робіт, присвячених загальним моделям зв’язку між тонкими провідниками в залежності від відстані між ними [1–5], повнохвильовому розсіянню скінченними провідними циліндричними структурами [6, 7], загальним обчислювальним методам [8] або сучасним концепціям поглинаючих матеріалів і метаматеріалів [10–12], ця робота безпосередньо фокусується на процесі поглинання випромінювання одиночним тонким провідником і демонструє його виражену резонансну поведінку.

Мета роботи полягає в аналізі фактора ефективності поглинання тонкого провідника скінченної довжини, що опромінюється нормально падаючою плоскою лінійно поляризованою електромагнітною хвилею, з урахуванням його залежності від довжини провідника.

1. Теоретичні співвідношення

Сильне поглинання електромагнітного випромінювання може відбуватися в дуже тонких провідниках, діаметр яких у кілька сотень разів менший за довжину хвилі випромінювання. Наприклад, розрахунки авторів показали, що фактор ефективності поглинання випромінювання з довжиною хвилі 10 см у платиновому провіднику діаметром 15 мкм досягає 260 (рис. 1). Це означає, що провідник поглинає в 260 разів більше енергії, ніж енергія, що падає на його геометричний поперечний переріз. Лінії потоку енергії поблизу провідника викривляються і провідник «фокусує» випромінювання на собі. Максимальне поглинання відбувається при дотриманні умови [13]

$$D \approx \lambda_i / 10,$$

де D — діаметр провідника; λ_i — довжина хвилі в матеріалі провідника. Видно, що провідник має бути дуже тонким.

Розрахунки цього ефекту раніше проводились для нескінченно довгих провідників. Але в роботі [14] показано, що резонансні ефекти в провідниках, довжину яких можна порівняти з довжиною хвилі випромінювання, можуть значно збільшити або зменшити ефективність взаємодії випромінювання з провідником. Тому актуаль-

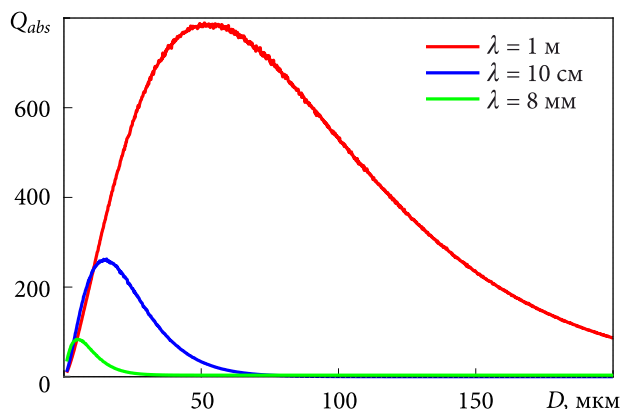


Рис. 1. Залежність фактора ефективності поглинання мікрохвильового випромінювання в тонкому платиновому провіднику

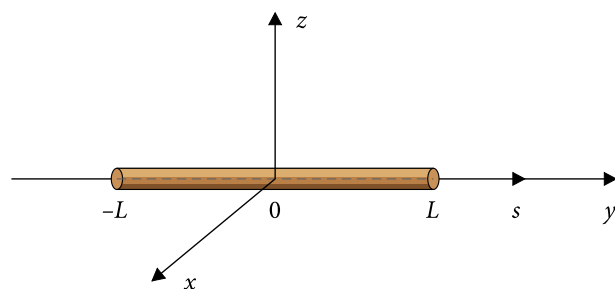


Рис. 2. Схема розрахункової моделі

ним завданням є дослідження залежності фактора ефективності взаємодії з випромінюванням від довжини провідника. У цій роботі описано результати досліджень поглинання випромінювання в тонкому металевому провіднику скінченної довжини.

На першому етапі необхідно визначити струм, що індукується в провіднику падаючою електромагнітною хвилею. На основі закону Джоуля-Ленца визначається потужність P_{abs} , що поглинається провідником, яка потім зіставляється з потужністю P випромінювання, що падає на провідник. З урахуванням цих даних знаходиться фактор ефективності поглинання випромінювання в провіднику:

$$Q_{abs} = \frac{P_{abs}}{P}.$$

Для розрахунку струму скористаємося методом теорії тонких імпедансних вібраторів, описаним у роботі [15]. Теоретичну модель задачі показано на рис. 2. Розглядається циліндричний провідник радіуса r і довжини $2L$, розташований у нескінченному однорідному середовищі,

що характеризується відносними діелектричною та магнітною проникностями ϵ_1, μ_1 . Термін «тонкий» означає виконання строгих геометричних нерівностей:

$$r \ll 2L, \quad r \ll \lambda_1,$$

де λ_1 — довжина хвилі в навколишньому просторі. Це дозволяє вважати струм у провіднику чисто поздовжнім, що залежить тільки від осової координати s , спрямованої вздовж провідника (рис. 2), і знехтувати азимутальною компонентою струму.

Нехай плоска лінійно E -поляризована хвиля падає на тонкий провідник у напрямку, протилежному осі Oz . Її компоненти поля мають такий вигляд:

$$E_y = E_0 e^{ik_1 z}, \quad H_x = -\frac{E_0}{Z_0} e^{ik_1 z}.$$

Тут E_0 — амплітуда електричного поля падаючої хвилі; $k_1 = k\sqrt{\epsilon_1 \mu_1}$ — хвильове число навколишнього простору з параметрами $\epsilon_1, \mu_1, k = 2\pi/\lambda$; $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 337$ Ом — хвильовий опір вільного простору.

У цьому випадку для тонкого прямолінійного імпедансного провідника для розподілу струму вздовж його $J(s)$ отримаємо таке інтегральне рівняння [15–17]:

$$\left(\frac{d^2}{ds^2} + k_1^2 \right) \int_{-L}^L J(s') \frac{e^{-ik_1 R(s, s')}}{R(s, s')} ds' = -i\omega \epsilon_1 E_0 + i\omega \epsilon_1 z_i(s) J(s), \quad (1)$$

де $R(s, s') = \sqrt{(s - s')^2 + r^2}$, $z_i(s)$ — внутрішній погонний імпеданс ([Ом/м]) провідника; ω — кругова частота.

Виділимо логарифмічну особливість ядра рівняння (1):

$$\int_{-L}^L J(s') \frac{e^{-ik_1 R(s, s')}}{R(s, s')} ds' = \Omega(s) J(s) + \int_{-L}^L \frac{J(s') e^{-ik_1 R(s, s')} - J(s)}{R(s, s')} ds'.$$

Тут

$$\Omega(s) = \int_{-L}^L \frac{ds'}{R(s, s')} = \Omega + \gamma(s), \quad (2)$$

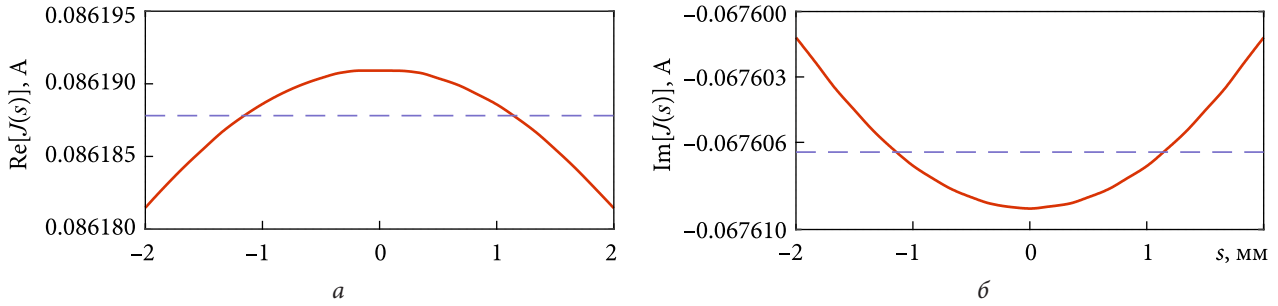


Рис. 3. Розподіл струму в графітовому провіднику. Суцільна лінія — дійсна (а) та уявна (б) частини струму, пунктирна лінія — середнє значення модуля струму

$\gamma(s) = \ln\{([L+s] + \sqrt{[L+s]^2 + r^2}) \times [(L-s) + \sqrt{[L-s]^2 + r^2}] / 4L^2\}$ — функція, що дорівнює нулю в центрі провідника та досягає свого найбільшого значення на його кінцях, де струм дорівнює нулю, $\Omega = 2 \ln \frac{2L}{r}$ — великий параметр (на практиці достатньо $\Omega \geq 10$). Тоді з урахуванням (2) рівняння (1) перетворюється на таке інтегро-диференціальне рівняння з малим параметром:

$$\frac{d^2 J(s)}{ds^2} + k_1^2 J(s) = \alpha \{ i\omega \varepsilon_1 E_{0s}(s) + F[s, J(s)] - i\omega \varepsilon_1 z_i(s) J(s) \}. \quad (3)$$

Тут $\alpha = \frac{1}{2 \ln[r/(2L)]}$ — малий параметр задачі ($|\alpha| \ll 1$),

$$F[s, J(s)] = - \frac{dJ(s')}{ds'} \frac{e^{-ik_1 R(s, s')}}{R(s, s')} \Big|_{-L}^L + \left[\frac{d^2 J(s)}{ds^2} + k_1^2 J(s) \right] \gamma(s) + \int_{-L}^L \left\{ \left[\frac{d^2 J(s')}{ds'^2} + k_1^2 J(s') \right] e^{-ik_1 R(s, s')} - \left[\frac{d^2 J(s)}{ds^2} + k_1^2 J(s) \right] \right\} / R(s, s') ds'$$

— власне поле провідника.

Для знаходження наближеного аналітичного розв'язку рівняння (3) скористаємося асимптотичним методом усереднення, основні положення, принципи та математичне обґрунтування якого наведено в [18–20]. Використовуючи при цьому методику, викладену в [15], отримаємо на-

ближений вираз для розподілу струму в тонкому імпедансному провіднику, розташованому в нескінченному однорідному середовищі:

$$J(s) = \alpha \frac{i\omega E_0}{k\tilde{k}} \left\{ 1 - \cos \tilde{k}(s+L) - \frac{\sin \tilde{k}(s+L) + \alpha P^s(s)}{\sin 2\tilde{k}L + \alpha P^s(L)} (1 - \cos 2\tilde{k}L) \right\},$$

де

$$P^s(s) = \int_{-L}^s \left[\frac{e^{-ikR(s', -L)}}{R(s', -L)} + \frac{e^{-ikR(s', L)}}{R(s', L)} \right] \sin \tilde{k}(s-s') ds',$$

$$\tilde{k}^2(s) = k_1^2 \left[1 + \frac{i\alpha\omega \varepsilon_1 z_i(s)}{k_1^2} \right] = k_1^2 \left[1 + \frac{i2\alpha \bar{Z}_s(s)}{\mu_1 k r} \right],$$

$$\bar{Z}_s(s) = 2\pi r z_i(s) / Z_0.$$

2. Аналіз фактора ефективності поглинання

Нехай електромагнітна хвиля, що має довжину хвилі випромінювання $\lambda = 8$ мм, у вільному просторі падає перпендикулярно на графітове волокно довжиною $2L = 4$ мм і діаметром $D = 15$ мкм. Електричний вектор хвилі паралельний осі волокна. Початкова густина потоку потужності випромінювання на виході хвилеводу з поперечним перерізом 7.2×3.4 мм² при потужності $P = 2$ Вт дорівнює $I = 81\,700$ Вт/м². На рис. 3, а показано розподіл активної складової струму вздовж довжини провідника, на рис. 3, б — те саме для реактивної складової. Середнє значення модуля струму становить $J = 0.110$ А. Видно, що величина струму практично однакова вздовж провідника.

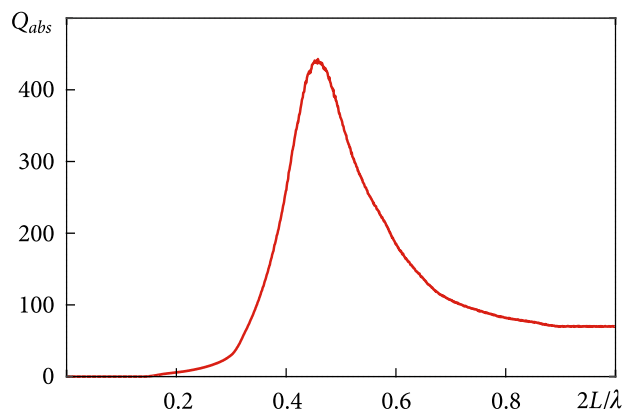


Рис. 4. Залежність фактора ефективності поглинання від довжини графітового провідника

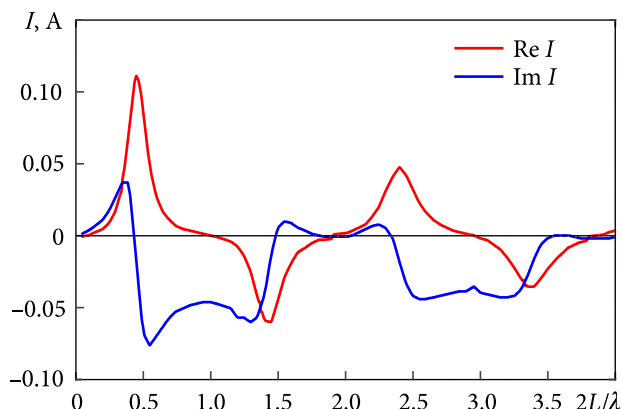


Рис. 6. Залежність струму від довжини графітового провідника

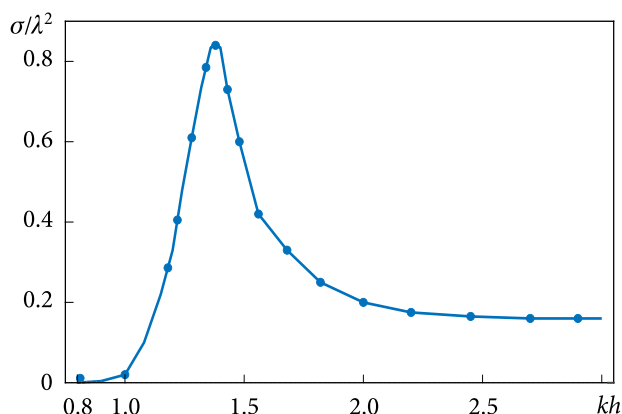


Рис. 5. Залежність фактора зворотного розсіяння тонкого сталевго вібратора від його електричної довжини kh . Суцільна лінія — теоретична крива, крапки — експериментальні дані (перебудовано авторами на основі [11])

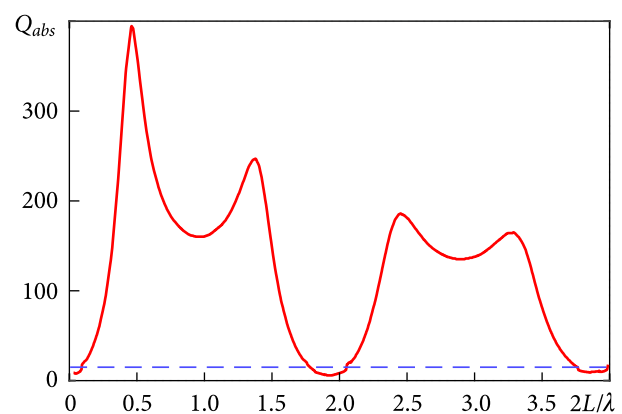


Рис. 7. Залежність фактора ефективності поглинання від довжини графітового провідника

Потужність випромінювання, що поглинається провідником $P_{abs} = I^2 \cdot R$, визначимо за законом Джоуля–Ленца з урахуванням його обчисленого опору. Опір можна оцінити за формулою для постійного струму $R = 2L/(\rho S)$, де $2L$ — довжина провідника, S — площа поперечного перерізу, ρ — питома провідність матеріалу провідника. Це можливо, оскільки ефект сильного поглинання випромінювання провідником спостерігається, коли радіус провідника можна порівняти з товщиною поверхневого шару, і провідник повністю заповнений струмом. У нашому випадку опір відрізка графітового волокна ($\rho \approx 10^5$ См/м) становить $R = 162$ Ом і він поглинає потужність $P_{abs} = 1.94$ Вт. При падінні початкового випромінювання з густиною потоку потужності $I = 81\,700$ Вт/м² перпендикулярно на графітове

волокно потужність падаючого випромінювання визначається співвідношенням $P = I \cdot 2L \cdot D$ і становить 4.9 мВт. Тоді фактор ефективності поглинання дорівнює $Q_{abs} = 396$.

Фактор ефективності поглинання залежить від довжини волокна. Вигляд цієї залежності показано на рис. 4. Як видно, вона має резонансний пік. Коли довжина провідника близька до половини довжини хвилі ($2L \approx 0.47\lambda$), поглинання досягає максимуму. При цьому співвідношенні взаємодія випромінювання з провідником є найбільш ефективною.

Ефективність розсіяння та сумарні коефіцієнти поглинання також зростають. Для порівняння на рис. 5 показано залежність коефіцієнта зворотного розсіювання тонкого сталевго провідника від електричної довжини. Графік перебудовано авторами на основі експериментальних даних, наведених у [21]. Діаметр провідника складає

0.35 мм, довжина хвилі випромінювання дорівнює 10 см, тому відношення $D/\lambda = 0.0035$ і провідник можна вважати тонким. Значення параметра електричної довжини провідника kh нанесено на вісь абсцис, де $k = 2\pi/\lambda$, h — половина довжини провідника. Положення максимуму знаходиться при $kh = 1.47$, що відповідає значенню $2L/\lambda = 0.47$ у наших позначеннях, тобто положення максимуму збігається з положенням максимуму в наших розрахунках. Значення σ/λ^2 відкладено по осі ординат, де σ — переріз зворотного розсіяння. У своїй максимальній точці його значення приблизно дорівнює 0.83. Це значення можна перетворити на фактор ефективності зворотного розсіяння

$$Q_s = \frac{P_s}{P},$$

де P — потужність, що падає на провідник; P_s — потужність, розсіяна в напрямку джерела випромінювання. Розрахунок дає значення $Q_s = 253$. Це значення має той самий порядок величини, що й фактор ефективності поглинання, як і очікувалося. Характер залежності на цьому графіку та на попередньому графіку однаковий. Спочатку фактор ефективності зворотного розсіяння зростає, досягає максимуму, потім зменшується, але не до нуля. Подібність графіків пояснюється тим, що як поглинання, так і розсіяння визначаються насамперед струмом у провіднику. Результати також збігаються з результатами, отриманими в [22].

Було досліджено залежність взаємодії випромінювання з більш довгими графітовими провідниками. На рис. 6 показано результати розрахунків величини струму для провідників довжиною до 4λ , а на рис. 7 — значення фактора ефективності поглинання. На рисунках видно, що максимуми поглинання розташовано в точках, де струм є активним, а мінімуми — в точках, де струм є реактивним, як і очікувалося. Максимуми поглинання розташовано на $2L \approx 1/2\lambda, 3/2\lambda, 5/2\lambda \dots$. У міру збільшення довжини провідника значення максимумів зменшуються. Пунктирною лінією на рис. 7 показано значення фактора ефективності поглинання для нескінченно довгого провідни-

ка. Воно також велике — близько 30, але значно менше резонансних значень.

Розглянемо докладніше термін «фактор ефективності поглинання». З визначення ясно, що це відношення потужності, поглиненої провідником, до потужності, що падає на провідник. Поглинена потужність може бути як меншою, так і більшою за ту частину потужності, що падає на провідник. Причиною цього можуть бути резонанси в провіднику, поверхневій хвилі та інші явища. Потужність випромінювання, що падає на провідник, залежить від відношення поперечних розмірів пучка до діаметра провідника. Тонкі провідники в широких пучках одержують невелику частку енергії пучка. Але завдяки високому фактору ефективності поглинання значна частина енергії пучка, що випромінюється, може передаватися провіднику — до 50 %.

Висновки

Спостерігається електродинамічне явище сильного поглинання електромагнітного випромінювання в дуже тонких провідниках, діаметр яких у сотні разів менший за довжину хвилі випромінювання. Розрахунки поглинання засновано на визначенні струму в провіднику, що виникає при падінні електромагнітного випромінювання на провідник. Використовуючи закон Джоуля–Ленца, розраховується поглинена потужність. Вона порівнюється з потужністю, що падає на провідник, і визначається фактор ефективності поглинання. Досліджено залежність поглинання енергії електромагнітного випромінювання в тонкому провіднику від його довжини. Вона має резонансний характер. Максимальне поглинання відбувається, коли довжина провідника близька до половини довжини хвилі випромінювання та є її кратною. При резонансі поглинання випромінювання в десятки разів більше, ніж у довгому провіднику. Це можна використовувати для створення поглиначів енергії випромінювання, захисних екранів у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль, призначених для захисту людей і обладнання від виявлення радіолокаційними станціями.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Zhang D., Liao Z., Chen B. Modeling of electromagnetic wave coupling to thin-wire structures in terrain environments using hybrid PE/TPIE method. *Int. J. Antennas Propag.* 2019. Vol. 2019, Iss. 1. 2839630. DOI: 10.1155/2019/2839630
2. Štumpfm M., Antonini G., Ekman J. Pulsed electromagnetic excitation of a thin wire – an approximate numerical model based on the Cagniard–Dehoop method of moments. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2024. Vol. 23, Iss. 2. P. 523–527. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3329035
3. Dommissie W.R., Du Plessis J.T., Cilliers P.I., Botha M.M., Rylander T. Macro basis functions for efficient analysis of thick wires in the MoM. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2024. Vol. 72, Iss. 7. P. 5865–5876. DOI: 10.1109/TAP.2024.3400054
4. Ye W., Liu W., Xiang N., Li K., Chen W. Fast and accurate transient analysis of thin-wire structure in half-space with peec method. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.* 2022. Vol. 65, Iss. 1. P. 300–311. DOI: 10.1109/TEMC.2022.3215453
5. Mattucci E., Štumpf M., Antonini G. Transient plane-wave response of a dual-loaded small-loop antenna using quasi-static thin-wire partial elements. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* 2026, Vol. 25, Iss. 3. P. 1279–1283. DOI: 10.1109/LAWP.2026.3653063
6. Lucido M., Migliore M.D., Pinchera D. A new analytically regularizing method for the analysis of the scattering by a hollow finite-length PEC circular cylinder. *Prog. Electromagn. Res. B.* 2016. Vol. 70. P. 55–71. DOI: 10.2528/PIERB16081404
7. Schettino F., Di Murro F., Lucido M. Scattering from a finite-length closed perfect electric conducting circular cylinder: a regularized full-wave analysis. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 2025. Vol. 383, Iss. 2303. 20240346. DOI: 10.1098/rsta.2024.0346
8. Papakanellos P.J., Tsitsas N.L., Anastassiou H.T. The method of auxiliary sources (MAS) in computational electromagnetics: A comprehensive review of advancements over the past two decades. *Electronics.* 2024. Vol. 13, Iss. 17. 3520. DOI: 10.3390/electronics13173520
9. Hambaryan D., Grigoryan N., Sarkisyan H., Petrosyan S. Dielectric coated conductive rod resonantly coupled with a microwave field. *Heliyon.* 2024. Vol. 10, Iss. 2. e24477. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24477
10. Zhang T., Li D., Yang Z., Duan Y., Zhang N., Wang L., Liang Q. A multi-materials 3D-printed continuous conductive fibre-based metamaterial for broadband microwave absorption. *Virtual Phys. Prototyp.* 2024. Vol. 19, Iss. 1. e2285417. DOI: 10.1080/17452759.2023.2285417
11. Peymanfar R., Dogari H., Selseleh-Zakerin E., Hedayatzaadeh M.H., Daneshvar S., Amiri-Ramsheh N., Aslibeiki B. Recent advances in microwave-absorbing materials fabricated using organic conductive polymers. *Front. Mater.* 2023. Vol. 10. 1133287. DOI: 10.3389/fmats.2023.1133287
12. Ch'en G., Li Z., Zhang L., Chang Q., Chen X., Fan X., Wu G. Mechanisms, design, and fabrication strategies for emerging electromagnetic wave-absorbing materials. *Cell Rep. Phys. Sci.* 2024. Vol. 5, Iss. 9. 102097. DOI: 10.1016/j.xcrp.2024.102097
13. Kokodii M.G., Natarova A.O., Gurina D.V., Priz I.O., Maslov V.O., Karlov V.D. Effect of anomalously strong absorption of electromagnetic radiation in fine conductive fibers. *Radio Phys. Radio Astron.* 2024. Vol. 29, Iss. 1. P. 76–82. DOI: 10.15407/rpra29.01.076
14. Ufimtsev P.Ya. *Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics*. Encino, CA, USA: Tech Science Press, 2010. 375 p.
15. Nesterenko M.V., Katrich V.A., Penkin Yu.M., Dakhov V.M., Berdник S.L. *Thin Impedance Vibrators: Theory and Applications*. Springer Science+Business Media, New York, 2011. 460 p.
16. Werner D.H., Werner P.L., Breakall J.K. Some computational aspects of Pocklington's electric field integral equation for thin wires. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1994. Vol. 42, Iss. 4. P. 561–563. DOI: 10.1109/8.286230
17. Forati E., Mueller A.D., Yarandi P.G., Hanson G.W. A new formulation of Pocklington's equation for thin wires using the exact kernel. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2011. Vol. 59, Iss. 11. P. 4355–4360. DOI: 10.1109/TAP.2011.2164211
18. Bogolyubov N.N., Mitropolsky U.A. *Asymptotic Methods in the Theory Nonlinear Oscillations*. Nauka, Moscow, 1974. 410 p.
19. Filatov A.N. *Asymptotic Methods in the Theory of Differential and Integral-differential Equations*. FAN, Tashkent, 1974. 216 p.
20. Nesterenko M. Analytical methods in the theory of thin impedance vibrators. *Prog. Electromagn. Res. B.* 2010. Vol. 21. P. 299–328. DOI: 10.2528/PIERB10020105
21. King R., Wu Tai Tzun. *Scattering and Diffraction of Waves*. Harvard University Press, 1959. 236 p.
22. Kokodii M., Gurina D. Absorption of microwave radiation in a thin conductor of finite length. *Proc. Xth Ukrainian Scientific-Practical Conf. on Prospective Directions of Modern Electronics, Information and Computer Systems (MEICS)*, Dnipro, Ukraine, 26–28 Nov. 2025. P. 240–241.

Стаття надійшла 23.06.2026

REFERENCES

1. Zhang, D., Liao, Z., and Chen, B., 2019. Modeling of electromagnetic wave coupling to thin-wire structures in terrain environments using hybrid PE/TPIE method. *Int. J. Antennas Propag.*, **2019**(1), 2839630. DOI: 10.1155/2019/2839630
2. Štumpfm, M., Antonini, G., and Ekman, J., 2024. Pulsed electromagnetic excitation of a thin wire — an approximate numerical model based on the Cagniard–Dehoop method of moments. *IEEE Antennas and Wirel. Propag. Lett.*, **23**(2), pp. 523–527. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3329035

3. Dommissie, W.R., Du Plessis, J.T., Cilliers, P.I., Botha, M.M., and Rylander, T., 2024. Macro basis functions for efficient analysis of thick wires in the MoM. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **72**(7), pp. 5865–5876. DOI: 10.1109/TAP.2024.3400054
4. Ye, W., Liu, W., Xiang, N., Li, K., and Chen, W., 2022. Fast and accurate transient analysis of thin-wire structure in half-space with peec method. *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, **65**(1), pp. 300–311. DOI: 10.1109/TEM.2022.3215453
5. Mattucci, E., Štumpf, M., and Antonini, G., 2026. Transient plane-wave response of a dual-loaded small-loop antenna using quasi-static thin-wire partial elements. *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, **25**(3), pp. 1279–1283. DOI: 10.1109/LAWP.2026.3653063
6. Lucido, M., Migliore, M.D., and Pinchera, D., 2016. A new analytically regularizing method for the analysis of the scattering by a hollow finite-length PEC circular cylinder. *Prog. Electromagn. Res. B*, **70**, pp. 55–71. DOI: 10.2528/PIERB16081404
7. Schettino, F., Di Murro, F., and Lucido, M., 2025. Scattering from a finite-length closed perfect electric conducting circular cylinder: a regularized full-wave analysis. *Phil. Trans. R. Soc. A*, **383**(2303), 20240346. DOI: 10.1098/rsta.2024.0346
8. Papakanellos, P.J., Tsitsas, N.L., and Anastassiou, H.T., 2024. The method of auxiliary sources (MAS) in computational electromagnetics: A comprehensive review of advancements over the past two decades. *Electronics*, **13**(17), 3520. DOI: 10.3390/electronics13173520
9. Hambaryan, D., Grigoryan, N., Sarkisyan, H., and Petrosyan, S., 2024. Dielectric coated conductive rod resonantly coupled with a microwave field. *Heliyon*, **10**(2), e24477. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24477
10. Zhang, T., Li, D., Yang, Z., Duan, Y., Zhang, N., Wang, L., and Liang, Q., 2024. A multi-materials 3D-printed continuous conductive fibre-based metamaterial for broadband microwave absorption. *Virtual Phys. Prototyp.*, **19**(1), e2285417. DOI: 10.1080/17452759.2023.2285417
11. Peymanfar, R., Dogari, H., Selseleh-Zakerin, E., Hedayatzadeh, M.H., Daneshvar, S., Amiri-Ramshah, N., and Aslibeiki, B., 2023. Recent advances in microwave-absorbing materials fabricated using organic conductive polymers. *Front. Mater.*, **10**, 1133287. DOI: 10.3389/fmats.2023.1133287
12. Ch'en, G., Li, Z., Zhang, L., Chang, Q., Chen, X., Fan, X., and Wu, G., 2024. Mechanisms, design, and fabrication strategies for emerging electromagnetic wave-absorbing materials. *Cell Rep. Phys. Sci.*, **5**(9), 102097. DOI: 10.1016/j.xcrp.2024.102097
13. Kokodii, M.G., Natarova, A.O., Gurina, D.V., Priz, I.O., Maslov, V.O., and Karlov, V.D., 2024. Effect of anomalously strong absorption of electromagnetic radiation in fine conductive fibers. *Radio Phys. Radio Astron.*, **29**(1), pp. 76–82. DOI: 10.15407/rpra29.01.076
14. Ufimtsev, P.Ya., 2010. *Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics*. Encino, CA, USA: Tech Science Press.
15. Nesterenko, M.V., Katrich, V.A., Penkin, Yu.M., Dakhov, V.M., and Berdnik, S.L., 2011. *Thin Impedance Vibrators: Theory and Applications*. Springer Science+Business Media, New York, 460 p.
16. Werner, D.H., Werner, P.L., and Breakall, J.K., 1994. Some computational aspects of Pocklington's electric field integral equation for thin wires. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **42**(4), pp. 561–563. DOI: 10.1109/8.286230
17. Forati, E., Mueller, A.D., Yarandi, P.G., and Hanson, G.W., 2011. A new formulation of Pocklington's equation for thin wires using the exact kernel. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **59**(11), pp. 4355–4360. DOI: 10.1109/TAP.2011.2164211
18. Bogolyubov, N.N., and Mitropolsky, U.A., 1974. *Asymptotic Methods in the Theory Nonlinear Oscillations*. Nauka Publ., Moscow, 410 p.
19. Filatov, A.N., 1974. *Asymptotic Methods in the Theory of Differential and Integral-differential Equations*. FAN, Tashkent, 216 p.
20. Nesterenko, M., 2010. Analytical methods in the theory of thin impedance vibrators. *Prog. Electromagn. Res. B*, **21**, pp. 299–328. DOI: 10.2528/PIERB10020105
21. King, R., Wu, and Tai, Tzun, 1959. *Scattering and Diffraction of Waves*. Harvard University Press. 236 p.
22. Kokodii, M., and Gurina, D., 2025. Absorption of microwave radiation in a thin conductor of finite length. In: *Proc. Xth Ukrainian Scientific-Practical Conf. on Prospective Directions of Modern Electronics, Information and Computer Systems (MEICS)*, Dnipro, Ukraine, 26–28 Nov. 2025, pp. 240–241.

Received 23.06.2026

M.G. Kokodii, S.L. Berdnik, A.V. Degtyarev, M.M. Dubinin, V.O. Maslov

V.N. Karazin Kharkiv National University

(ROR: <https://ror.org/03ftejk10>), Kharkiv, Ukraine

MICROWAVE ABSORPTION IN THIN CONDUCTORS OF FINITE LENGTH

Subject and Purpose. Many of the currently known calculations of the strong absorption of electromagnetic radiation in conductors whose diameter is several hundred times smaller than the radiation wavelength proceed from the physical effects accompanying interaction of an electromagnetic wave with an infinitely long conductor. However, antenna theory shows that resonant phenomena in finite-sized conductors can significantly enhance or suppress the interaction of conductors with electromagnetic radiation. This paper examines the interaction of a thin conductor of finite length with a plane, linearly polarized electromagnetic wave, focusing in particular on the amount of energy absorption and the effects due to the length of the conductor.

Methods and Methodology. The solution to the integral equation for the current through a thin conductor has been sought for in an asymptotic averaging technique. Using the Joule-Lenz law and calculating the conductor's resistance, the power absorbed by the conductor is calculated. This allows determining the absorption efficiency factor for the radiation incident on a conductor of finite length.

Results. The amount of the electromagnetic radiation energy absorbed within a thin conductor has been studied in dependence on the conductor's finite length. As has been found, when the length of the conductor is close to half the radiation wavelength, else to a multiple of that value, the absorption increases by tens of times compared to the value demonstrated by an infinitely long conductor.

Conclusions. The results permit clarifying the previously existing understanding of the interaction of microwave radiation with thin conducting structures and can find application in the development of compact absorbing loads, field shielding elements and structures for microwave energy transmission.

Keywords: *microwave radiation, thin conductors, energy absorption, resonance effects, electromagnetic interaction.*