

*В.В. СЕМЕНЕЦЬ, д-р техн. наук*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БІОСИСТЕМИ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОКОНТРОЛЕРА STM32F407VG

### Вступ

Вплив магнітного поля (МП) на біосистеми (БС) досліджується та використовується в медицині вже багато десятиліть [1–4]. Застосовувані параметри МП різняться за величиною, просторовою однорідністю, орієнтацією щодо біологічного об'єкта, часовими характеристиками.

Із природних МП найважливішим для живого на Землі є МП Землі та навколосезонного простору, що має постійну та змінну складові. Величина постійної складової індукції МП Землі зростає від екватора до магнітних полюсів від 41,8 до 69,5 мкТл. На поверхні Землі коливання індукції геомагнітного поля знаходяться у діапазоні частот від 4–10 до 104 Гц, та його амплітуди у спокійні за геофізичними показниками дні перебувають у межах 2 пТл ... 0,1 мкТл. Коливання амплітуд індукції МП під час магнітних бур знаходяться у межах 0,1...0,5 мкТл.

Спектральні ознаки МП промислової частоти (ПЧ) подібні до спектральних ознак магнітних бур.

Для людини низькочастотне МП вважається безпечним, якщо величина його індукції вміщується у 0,2 мкТл. Така величина індукції у низці країн визначена як максимально допустима для населення. Всесвітня організація охорони здоров'я також радила дотримуватись максимально допустимого рівня МП для населення, що становить 0,2 мкТл.

### Основні підходи до опису електромагнітних полів

Параметрами поля для найпростішої плоскої хвилі можуть служити вектор електричного поля  $\vec{E}$ , вектор магнітного поля  $\vec{H}$ , а також усереднені за часом величини: щільність енергії електричного поля  $W^E$ , щільність енергії магнітного поля  $W^M$ , щільність енергії сумарного поля  $W$  та щільність потоку потужності  $P$ . Всі перераховані величини поля можуть бути виміряні для найпростішої плоскої хвилі. Якщо відомі характеристики середовища, кожна величина визначається досить точно.

У ближньому чи багатопронемовому полі рівняння для плоскої хвилі перестають бути справедливими. Відношення фундаментальних величин поля можуть змінюватися в широких межах залежно від просторового положення точки прийому та локальної структури поля поблизу цієї точки. Так, стояча хвиля, утворена в результаті взаємодії двох плоских хвиль однакової амплітуди і однієї й тієї ж лінійної поляризації, але що розповсюджуються в різних напрямках, має нульову усереднену за часом щільність енергії, хоча  $W^E$  і  $W^M$  можуть в чотири рази перевищувати відповідні величини початкових хвиль в деяких конкретних точках. Далі, в межах реактивної зони джерел, середня за часом щільність потужності може прагнути малого значення, тоді як  $E$  і  $H$  може бути доволі великі [5].

Оскільки щільність потужності не може бути адекватною мірою небезпеки або електромагнітної інтерференції у ближньому або багатопронемовому полі, виникає необхідність у розробці відповідних критеріїв.

### Модель поширення електромагнітних хвиль у приміщенні

Для характеристики потенційної небезпеки впливу електромагнітного поля найбільше широко будуть застосовуватися параметри  $|E|^2, W^E, W$ .

Проте для отримання загальної фізичної картини поля у приміщеннях з медичним обладнанням при описі структури поширення електромагнітного поля (ЕМП) зручнішою є напруженість електричного поля.

Аналітичний метод розрахунку поля у межах виробничого приміщення не може бути застосований внаслідок того, що поле є суперпозицією прямої хвилі (активні джерела випромінювання, антени), більшої кількості відбитих хвиль та зовнішніх джерел, що мають випадкові амплітуди та фази.

Для оцінки перевипромінювачів зазвичай вводять величину ефективної площі розсіювання [5]. Оскільки випромінювання походить з антени, а число перевідбитих тіл, як і випромінювачів, випадково, зрозуміла неможливість детермінованого визначення напруженості поля на робочому місці [6].

Миттєве значення напруженості поля у точці прийому може бути визначене за формулою [1]

$$E = \frac{\sqrt{60P_1G_1}}{r} e^{i\omega t - kr} \left[ B + \sum_{j=1}^n \frac{\xi_j B_j R_j}{r + \Delta r_j} e^{-i\kappa \Delta r_j + \Theta_j} \right] + \sum_{s=1}^s \frac{\sqrt{60P_2G_2}}{r_s} e^{i\omega t - kr_s} \left[ B_s + \sum_{t=1}^m \frac{\xi_t B_s R_t r_s}{r_s + \Delta r_t} e^{-i\kappa \Delta r_t + \Theta_t} \right] + \sum_{g=1}^a \frac{\sqrt{60P_3G_3}}{r_g} e^{i\omega t - Kr_g} \left[ B_g + \sum_{\gamma=1}^p \frac{\xi_\gamma B_g R_\gamma r_g}{r_g + \Delta r_\gamma} e^{-i\kappa \Delta r_\gamma + \Theta_\gamma} \right] \quad (1)$$

де –  $P_1, P_2, P_3$  потужність джерел випромінювання;  $G_1, G_2, G_3$  – коефіцієнти посилення антен;  $r, r_s, r_g$  – відстань від джерел до точки визначення;  $\omega$  – кругова частота,  $t$  – час існування небезпеки;  $\kappa$  – коефіцієнт вихрових струмів;  $\Delta r_j$  – різниця відстаней,  $\Theta$  – зсув фаз;

$B_j$  – множники ослаблення;  $R_j$  – коефіцієнт відображення.

Вирази в квадратних дужках є функціями ослаблення, що характеризують відмінність реального поля від поля у вільному просторі. Очевидно, що вони є випадковими величинами, визначеними деякими законами розподілу ймовірностей, що також описують зміну амплітудних і фазних значень напруженості поля.

На робочому місці при нерухомому випромінювальному пристрої амплітуда напруженості поля прямої хвилі практично постійна, якщо в межах першої зони Френеля [7] відсутні предмети, що переміщуються. Огинаюча і фаза сумарного поля відбитих хвиль і паразитних випромінювань на робочих місцях випадкові і залежить від взаємного розташування випромінюючого пристрою, робочого місця, пасивних і паразитних випромінювачів. Якщо відсутні переміщення перевипромінювачів у межах приміщення, то огинаюча і фаза суми векторів прямої хвилі, векторів відбитих хвиль та паразитного випромінювання не змінюються у часі.

### Моделювання джерел паразитних випромінювань

Основні властивості відкритих систем визначаються дифракційними явищами, звідси вивчення цих структур можна звести до дифракційної задачі замкнутої металевої поверхні з розрізами і отворами. З електродинамічної точки зору це означає, що потрібно знайти вирішення неоднорідних рівнянь Максвелла з джерелами та розривними граничними умовами.

У виробничих умовах щілинні випромінювачі найчастіше розташовуються на обмежених поверхнях неправильної форми. Можливий найпростіший підхід розв'язання задачі, що полягає у заміні криволінійної металевої поверхні на дотичну металеву площину (нескінченний фланець). Шляхом зіставлення результатів небагатьох строгих рішень задач випромінювання щілин на криволінійних поверхнях (куля, циліндр, клин та ін) встановлено, що цей підхід може з успіхом використовуватися для розрахунку провідностей випромінювання

резонансних щілин на поверхнях, лінійні розміри яких (а також радіуси кривизни в місці розташування) мають порядок довжини хвилі, а то і більше.

На підставі викладеного далі отримано розрахункові формули, придатні з погляду аналізу та захисту від впливу паразитних випромінювань медичного персоналу, який використовує у своїй роботі складне обладнання діапазону НВЧ.

Одиночна щілина, прорізана в стінці прямокутного хвилеводу, є випромінюючою, якщо своєю широкою стороною вона перетинає лінії розповсюдження поверхневих струмів, що тече по внутрішніх стінках хвилеводу.

Поперечна щілина на широкій стінці збуджується поздовжніми струмами, причому інтенсивність збудження її зменшується при зміщенні центру щілини від середини широкої стінки. Поздовжня щілина перетинає поперечний струм, якщо вона зсунута щодо середини широкої стінки хвилеводу. Її випромінювання зростає з наближенням щілини до краю широкої стінки і відсутня при  $x_0 = \frac{a}{2}$ .

Похила щілина у вузькій стінці збуджується поперечним струмом. Тому інтенсивність її збудження регулюється підбором кута нахилу  $\delta$ . При  $\delta = 0$  ця щілина не збуджується, при  $\delta = 90^\circ$  випромінювання максимальне.

Для напівхвильової щілини ( $2l = 0,5\lambda$ ) формула набуває вигляду

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sin\theta\right)}{\cos\theta} \approx \cos\theta. \quad (2)$$

### Оцінка можливостей моделювання

За допомогою формул діаграми спрямованості (ДС) щілини в нескінченному екрані можна також орієнтовно оцінити ДС в площині нормальної осі хвилеводу для випадків поперечної щілини у вузькій стінці [8]. Це пояснюється тим, що вздовж від щілини випромінювання відсутнє, і тому розміри екрану в цьому напрямку мало впливають на ДС, як у  $E$ -площині щілини, так і у  $H$ -площині.

При визначенні ДС в площині нормальної осі хвилеводу для поздовжньої щілини в широкій стінці слід враховувати, що кінцеві розміри хвилеводу в напрямку, перпендикулярному від щілини, істотно впливають на ДС. Це зв'язано з тим, що у цій площині яскраво виражено явище дифракції хвиль край екрану, роль якого грає стінка хвилеводу. Якщо екран кінцевий у напрямі, перпендикулярному щілини, то на його краях виходить різка неоднорідність розподілу електричного поля, оскільки нормальна складова поля розривна під час переходу поверхню хвилеводу. Внаслідок цього хвилі від країв хвилеводу відображатимуться та інтерферуватимуть із полем, що безпосередньо випромінюється щілиною. Таким чином, на власне випромінювання щілини накладається додаткове випромінювання, що з'являється за рахунок збудження країв хвилеводу, що призводить до появи поля за тінговою стороною хвилеводу та спотворення діаграми спрямованості в передньому напівпросторі. Внаслідок інтерференції хвиль, що випромінюються безпосередньо щілиною та діафрагмують у країв хвилеводу, з'являються мінімуми та максимуми випромінювання, кількість яких тим більша, чим більший розмір хвилеводу в порівнянні з довжиною хвилі.

При збільшенні довжини щілини до половини довжини хвилі коефіцієнти випромінювання і відбиття зростають. У міру збільшення ширини щілини максимуми зазначених залежностей зміщуються у бік великих довжин щілини.

Методика вимірювань передбачала використання мікроконтролера (МК) як реєстратор величини магнітного поля. Апаратне забезпечення системи побудовано на МК STM32F407VG та датчику А3144 (рис. 1).

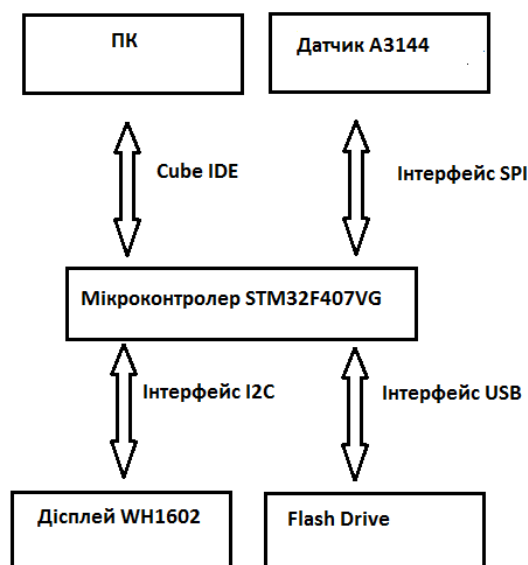


Рис. 1. Структурна схема вимірювання магнітного поля

Датчик встановлюється на об'єкті моніторингу та підключається по шині до МК. Мікроконтролер збирає дані з датчика та їх обробляє (рис. 2).



Рис. 2. Програмно-апаратний комплекс

Така вбудована система постійно відстежує магнітне поле в режимі реального часу та аналізує його параметри. Система може вчасно попередити про ймовірну несправність, що дає змогу користувачеві здійснити своєчасні профілактичні заходи.

Датчики Холла бувають двох типів: аналогового та цифрового. Аналогові сенсори перетворюють індукцію магнітного поля на напругу, знак і величина якого залежатимуть від полярності та сили поля. Цифровий датчик визначає тільки наявність або відсутність магнітного поля (логічні «1» або «0»). Даний датчик Холла має 4-контактний інтерфейс для підключення до мікроконтролера. Контакт АО – аналоговий вихід обміну даними між датчиком і мікроконтролером; контакт DO – цифровий вихід; VCC – напруга живлення; GND – загальний контакт.

Відповідно до розробленого алгоритму програмна частина мікроконтролера STM32F407VG працює в режимі моніторингу. Після старту програми відбувається ініціалізація портів введення-виведення інформації, підключення стандартних бібліотек, що забезпечують роботу ЖК-індикатора та USB-інтерфейсу. Аналогові входи мікроконтролера підключені до схеми виміру. Аналогові сигнали перетворюються на цифрові за допомогою АЦП. Значення змінних виводяться на ЖК індикатор і відправляються або в комп'ютер, або на flash drive для обробки і прийняття рішення.

## Висновки

Використання щільності енергії як нормованої величини для визначення системи захисту дозволяє виразити інтенсивності електричних, магнітних і електромагнітних полів у однакових одиницях виміру (енергія на одиницю обсягу).

Зважаючи на просту структуру рівнянь, що описують щільність енергії, результати вимірювання поля складної конфігурації легко можуть бути перераховані в еквівалентні щільності енергії поля плоскої хвилі, що дозволяє порівняти ці дані з існуючими результатами вимірювання щільності потужності та оцінками ступеня небезпеки поля плоскої хвилі.

З погляду захисту від паразитних випромінювань виникає необхідність вибору для кожного конкретного приміщення його фізичного аналогу – щілини у хвилеводах різної конфігурації. Причому розподіл фаз інтересу не становить, а інформативна лише оцінка інтенсивності (потужності) випромінювання. Для цього створено лабораторну базу [9] та напрацьовано досвід створення телемедичних сервісів, що виявляється корисним для розробки систем захисту медперсоналу.

## Список літератури:

1. Analysis of the electromagnetic situation and modeling of sources of parasitic radiation / V.V. Semenets, T.E. Stytsenko // Radiotekhnika. 2016. № 184. P. 155–163.
2. Study of the influence of magnetic field and ultrasound on biosystems / I.S. Bondarenko, O.N. Bogdan // Radiotekhnika. 2018. № 194. P. 138–146.
3. Golestani-Rad L. Rigorous analysis of EM-wave penetration into a typical room using FDTD method: The Transfer Function concept / L. Golestani-Rad, J. Rashed-Mohassel, Danaie // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 913–926.
4. Andreev P.G., Naumova I.Yu., Moskvitina O.V. Determination of the complex reflection coefficient of electromagnetic waves indoors // Proceedings of the International. Symposium "Reliability and Quality". 2013. Vol. 2. P. 25–28.
5. Gerasimov S.V. Methodology for assessing measurement accuracy during measurement control of parameters of complex technical complexes / S.V. Gerasimov, V.V. Stadnik, M.Yu. Yakovlev // Zb. Nauk. Prc. / Institute of Modeling Problems in Energy. K. : IPM, 2004. Issue 26. P.30–35.
6. Vorobyov G.S. Radiophysical methods for diagnosis of materials and environments: monograph / G.S. Vorobyov et al. Sumy : Sumy State University, 2014. 171 p.
7. Gorobets N.N., Ovsyannikova E.E. Electromagnetic fields and waves near aperture antennas of large electrical sizes // Vestnik of V.N. Karazin KhNU. 2014. Issue. 24, №11. P.111–118.
8. Avrunin Oleg G., Nosova T. and Semenets V. Experience of Developing a Laboratory Base for the Study of Modern Microprocessor Systems // Proceedings of I International Scientific and Practical Conference "Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs". MC&FPGA-2019, Kharkiv, Ukraine, 2019. P. 6–8.
9. Kaliuzhnyi M., Semenets V., OrlenkoV., Guo, Q., Zheng Y. Synthesis of a Single-Channel Device for Receiving and Primary Signal Processing under Conditions of Structural-Parametric A priori Uncertainty // 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week, UkrMW 2022 – 2022. P. 573–578. DOI: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037164

*Надійшла до редколегії 12.01.2026*

*Прийнята до друку після рецензування 23.04.2026*

*Публікація (оприлюднення) 30.04.2026*

*Відомості про автора:*

**Семенець Валерій Васильович** – д-р техн. наук, професор. Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри біомедичної інженерії, Україна; e-mail: [valery.semenets@nure.ua](mailto:valery.semenets@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8969-2143>