

*В.В. СЕМЕНЕЦЬ, д-р техн. наук, Т.Е. СТИЦЕНКО, канд. техн. наук,
О.В. ГРИГОР'ЄВ, канд. техн. наук*

РОЗРОБКА МОДЕЛІ БІОМЕДИЧНОЇ СИСТЕМИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ПРИ ВПЛИВІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Вступ

У багатьох системах для оцінки ефективності захисту від електромагнітного випромінювання використовується доза шкідливого впливу як критерій безпеки біомедичної системи. Будь-який шкідливий вплив у технічній системі негативно впливає на життєдіяльність людини, тобто є неминучим злом чи «платою за технічний прогрес» [1–3].

Складні системи біологічного захисту (СБЗ) можна розглядати як системи контролю та управління електромагнітним випромінюванням (ЕМВ). Ці системи можна поділити на автоматичні та ергодичні. В останніх, що отримали в даний час широке поширення, певну роль у контролі та управлінні відіграє інженер-оператор з випробування медичних приладів та систем. Для ергодичних систем необхідна оцінка кількості інформації, яка може бути передана системою інженеру-оператору за допомогою того чи іншого сигналу за певні часові інтервали

У статтях [4–7] описується спосіб оцінки ефективності роботи системи біомедичного захисту з урахуванням оцінки дози шкідливого впливу. При розробці складних систем можливо здійснити математичне моделювання ідеальних та реальних процесів контролю та управління на безперервних і дискретних моделях.

У класичній постановці завдання синтезу системи захисту взагалі не може бути вирішена через відсутність статистичних даних. Тому у статті вона вирішується покроковим способом шляхом дослідження ЕМВ від різних джерел.

Як критерій рівня забезпечення безпеки біомедичної системи життєдіяльності використовується запропонований у роботі [5] критерій – захисна функція, яка дозволяє порівнювати існуючі технічні системи за рівнем їхньої безпеки. Зважаючи на складність та неоднозначність вибору глобального критерію, розглянемо спочатку СБЗ без урахування її зв'язків з іншими елементами системи «біологічний об'єкт-прилади-середовище».

Модель біомедичної системи життєдіяльності

Нехай $D \geq 0$ – доза шкідливого впливу. Індексом «з» далі скрізь позначатиметься значення параметра системи або величини шкідливого фактора, отримане в результаті (і після) дії системи біологічного захисту. Таким чином, D_z – значення D після дії захисту.

Введемо функцію Φ , яка зв'язує ці величини:

$$\Phi(D, V(t), t) = D_z \quad (1)$$

Назвемо $\Phi(D, t)$ захисною функцією системи біологічного захисту.

Очевидно, що $0 \leq \Phi(D, \vec{V}, t) \leq D$ и $\Phi(0, \vec{V}, t) = 0$.

У разі лінійності функції $\Phi(D, t)$ по змінній D має місце співвідношення

$$D_z = K_3(\vec{V}, t) D.$$

Функцію

$$K_3(\vec{V}, t) = \hat{O}(1, \vec{V}, t) \quad (2)$$

назвемо коефіцієнтом захисту.

Ця технічна система захисту (ТСЗ) є структурною, тобто її параметри не залежать від часу. І тут розробка системи зводиться до вибору значень параметрів, які дають мінімум K_3 .

Оптимізація ТСБЗ природно розбивається на два ієрархічні рівні: верхній (перший) рівень – структурна оптимізація: вибір типів захисних пристроїв, їх розташування та зв'язків ТСЗ, і нижній (другий) рівень – параметрична оптимізація самих пристроїв за відомої структури ТСБЗ. Нині перший рівень слабо формалізований і виконується переважно вручну, виходячи з особистого досвіду розробника, чи з допомогою експертних оцінок.

Нехай на нижньому (параметричному) рівні оптимізації відомий набір $\{Z_i\}$ із m ($i = 1, \dots, m$) захисних пристроїв, кожний із яких описаний залежністю коефіцієнта захисту K_3 від параметрів H_k цього пристрою:

$$\hat{E}_\zeta = Z^{n_i}(H_1, \dots, H_{n_i}), \quad (3)$$

де n_i – верхній індекс, що означає розмірність векторів параметрів i -го пристрою;

$$H^i = \bigotimes_1^{n_i} \{H_k^i\}.$$

На множині H^i для кожного індексу i , тобто для i -го пристрою, визначена функція вартості

$$C_i^{n_i}(H_1, \dots, H_n) > 0.$$

Тут і далі, якщо йдеться про конкретний пристрій, індекс будемо опускати. Символ \bigotimes_1^n означає декартовий добуток з n множин. Конкретизація параметрів $\{H_k\}$ залежить від типу пристрою захисту.

Якщо рівень шкідливих чинників трохи коливається біля свого середнього значення, можна орієнтуватися на існуючі норми гранично допустимих шкідливостей. У цьому випадку вихідна вимога до K_3 матиме вигляд

$$K_3 \leq \frac{X_{\text{норм}}}{x}.$$

Якщо шкідливі фактори зовнішнього середовища робочого місця змінюються в часі і в операторі «вплив – ефект» спостерігається кумулятивна складова, то доцільний дозовий підхід до вибору K_3 .

При дозовому підході в загальному випадку допустимим є наступне наближення для біодії y

$$y = \varphi \left(\int_0^T g(x(\tau)) d\tau \right),$$

де φ, g – монотонні незменшуючі функції.

Визначення нормативу дози $D_{\text{норм}}$ за зміну знаходиться з рівняння

$$y_{\text{норм}} = \varphi(D_{\text{норм}}). \quad (4)$$

Так як φ – монотонна функція, то рівняння (4) має єдине рішення

$$D_{\text{норм}} = \varphi^{-1}(y_{\text{норм}}).$$

Після цього K_3 визначається із співвідношення

$$\int_0^T g(K_3 x(\tau)) d\tau \leq D_{\text{норм}}. \quad (5)$$

У першому наближенні тут можна обмежитися нагодою $x(\tau) = \text{const}$.

Тоді мають місце співвідношення:

$$g(K_3x)T \leq D_{\text{норм}} \Leftrightarrow g(K_3x) \leq \frac{D_{\text{нг}}}{T} \Leftrightarrow K_3x \leq g^{-1}\left(\frac{D_{\text{норм}}}{T}\right) \Leftrightarrow K_3 \leq \frac{g^{-1}\left(\frac{D_{\text{норм}}}{T}\right)}{x}.$$

З іншого боку, оскільки $\int_0^T g(x)dt = Tg(x) = D$ – величина дози за зміну без застосування захисту, то $x = g^{-1}\left(\frac{D}{T}\right)$.

Таким чином, при дозовому підході в першому наближенні можна прийняти умову

$$K_3 \leq \frac{g^{-1}\left(\frac{D_{\text{норм}}}{T}\right)}{g^{-1}\left(\frac{D}{T}\right)}. \quad (6)$$

Зазначимо, що в окремому випадку $g(x) = x$ нерівність (5) має вигляд

$$\int_0^T K_3x(\tau)d\tau \leq D_{\text{норм}},$$

або

$$K_3D \leq D_{\text{норм}} \Leftrightarrow K_3 \leq \frac{D_{\text{норм}}}{D}.$$

Величина D може бути визначена експериментально, а для проєктованих систем – виходячи з узагальненого структурного методу.

При нездатності дозового підходу вибір K_3 повинен спиратися безпосередньо на модель взаємозв'язку "вплив – ефект". Для лінійної динамічної моделі маємо:

$$y(t) = \int_0^t w(\tau)x(t-\tau)d\tau. \quad (7)$$

Момент t_0 вибирається із умови максимальної біодії $\max_{t \in [0; T]} y(t) = y(t_0)$.

Тоді вимога до K_3 визначається із співвідношення

$$K_3 \leq \frac{y_{\text{норм}}}{\int_0^{t_0} w(\tau)x(t_0-\tau)d\tau} = \frac{y_{\text{норм}}}{y_{\text{max}}}. \quad (8)$$

Для проведення цієї оцінки потрібна інформація про характер зміни $x(t)$ протягом робочої зміни T . Для діючих виробництв ці характеристики можна отримати експериментально. Для проєктованих технологічних процесів раціональним є чисельне стохастичне моделювання функції $x(t)$ з урахуванням апріорної інформації.

На етапі технічного проєкту будь-якого із засобів або пристроїв захисту необхідно вирішувати завдання:

$$\text{opt} K_3 | C \leq C^*, \quad (9)$$

де роль C^* грає величина вартості C на етапі техніко-економічного обґрунтування. У разі оптимізації системи із m пристроїв зазначимо, що $K_3 \neq \sum_{i=1}^m k_{i3}$.

Щодо критерію вартості C , то він традиційно вважається адитивним:

$$C = \sum_{i=1}^m C_i. \quad (10)$$

Розглянемо тепер завдання оптимізації верхнього рівня – структурне. Для першого наближення будемо вважати, що розміщення всіх пристроїв оптимально, зазначивши, що в області оптимального геометричного розміщення відомі значні результати, які можуть бути використані при необхідності. Таким чином, наше завдання звелось до оптимального вибору v пристроїв із сукупності N .

Усього можливостей вибору $\sum_{v=1}^N C_N^v = 2^N - 1$, оскільки порядок вибору ролі не грає, а кількість обраних пристроїв (визначається ефективністю та вартістю) може бути будь-яким $1 \leq v \leq N$. Це завдання може бути назване «завданням оптимізації на поєднаннях» (за аналогією з терміном «оптимізація на перестановках») і записується подібно до завдань (9) і (10):

$$1) \underset{\Omega_N}{opt} K_3 | C \leq C^*; \quad 2) \underset{\Omega_N}{min} C | K_3 \leq K^*, \quad (11)$$

де Ω_N – множина всіх поєднань із N по $1 \leq v \leq N$.

Зазначимо, що тут під «пристроєм» можна розуміти і макропристрій. У завданнях (11) передбачається, що оптимізація на нижньому рівні вже здійснено. В іншому випадку змінні K_3 і C будуть нечіткими.

За методикою, викладеною в цій статті, були виміряні ε' і ε'' матеріалу з бікарболонової нитки при $\lambda = 3,2$. З використанням розрахункових співвідношень було розраховано коефіцієнти ослаблення падаючого ЕМВ для плоского екрана від його товщини та побудовано номограми (рис. 1). При цьому, очевидно, експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними.

Так само можна побудувати залежності (щодо базового циліндричного екрана $d = 0,8$ см) потужності від товщини циліндричного екрана.

З рис. 1 видно, що якщо використовувати матеріал, що екранує, з бікарболонової нитки, ослаблення ЕМВ на 17 дБ забезпечується матеріалом товщиною $d = 1,2$ см.

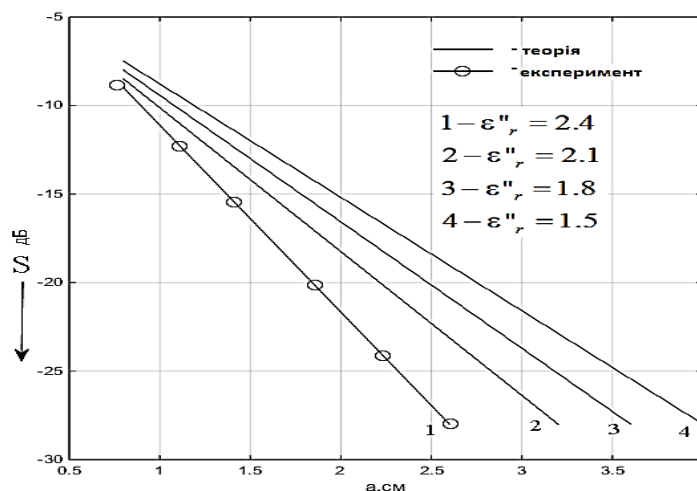


Рис. 1. Залежність коефіцієнта екранування плоского екрана від його товщини

Висновки

Розроблено оцінку ефективності роботи системи біомедичного захисту на основі оцінки дози шкідливого впливу електромагнітного випромінювання, що дозволяє порівняти існуючі технічні системи за рівнем їхньої безпеки.

Розроблено функціональну модель біомедичної системи життєдіяльності з різними джерелами електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону на основі детерміністських критеріїв, які дозволяють з певною ймовірністю оцінити виконання завдання функціонування системи життєдіяльності.

Статистичний критерій побудований з урахуванням вартості системи, що дозволяє при побудові систем біологічного захисту на підставі загальних моделей отримати розрахункові формули, що пов'язують нововизначений критерій якості системи з параметрами, які можна порівняно легко виміряти та нормувати з біологічних та санітарних міркувань, що і визначає практичну цінність роботи.

Список літератури:

1. Дзюндзюк Б.В. Основи безпеки ерготичних систем. Київ, 1990. 56 с.
2. Sean E. Maximally Reliable Markov Chains Under Energy Constraints / E. Sean, S. Escolay, M. Eisele, K. Miller, L. Paninski // *Neural Computation*. 2009. Vol.21, Is.7. P.1863–1912.
3. Watanabe O. Analysis of a randomized local search algorithm for LDPC decoding problem / O. Watanabe, T. Sawai, H. Takahashi // *Lecture Notes in Comp.* 2003. Vol. 2827. P.50–60.
4. Grendar M. Maximum Probability and Maximum Entropy methods: Bayesian interpretation // *Bayesian inference and Maximum Entropy methods in Science and Engineering*. 2005. Vol.2. P. 90–494.
5. Freire N. Entity Recognition and Resolution in Semi-structured Data / N. Freire // *JCDL*. 2011. P.12–17.
6. Gorban A.N. Entropy: The Markov Ordering Approach / A.N. Gorban, P.A. Gorban, G. Judge // *Entropy*. 2010. Vol.12. P. 1145–1193.
7. Семенець В.В., Леонідов В.І. Використання мікроконтролера STM32f407vg для дослідження амплітудно-частотних характеристик біологічних тканин // *Радіотехніка*. 2023. Вип. 214. С. 94–101.

Надійшла до редколегії 11.09.2024

Відомості про авторів:

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

Стиценко Тетяна Євгенівна – канд. техн. наук, доц., Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри безпекової інженерії, Україна; e-mail: tatiana.stytsenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4530-0253>

Григор'єв Олександр Вікторович – канд. техн. наук, доц., Харківський національний університет радіоелектроніки; Україна; e-mail: oleksandr.hryhoryev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6467-7983>