

УДК [623.611:621.396]:519.876.5

**А.П. Волобуєв<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с.****І.Ю. Волобуєва<sup>1</sup>****О.Ю. Коркін<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ, Україна<sup>2</sup>Військова академія (м. Одеса), Україна

## **МЕТОД МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІНУ В СИСТЕМІ РАДІОЗВ'ЯЗКУ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ТЕНЗОРНОГО ЧИСЛЕННЯ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ СТІЙКІСТЮ ЗВ'ЯЗКУ В ПРОЦЕСІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НЕОБХІДНОГО РІВНЯ ЇЇ РАДІОМАСКУВАННЯ**

*У статті запропонований метод математичного моделювання інформаційного обміну в системі радіозв'язку військового призначення на основі тензорного числення для управління стійкістю зв'язку в процесі забезпечення необхідного рівня її радіомаскування. В якості стійкості зв'язку розглядається стійкість динаміки 4-тензору електромагнітного поля в об'ємі приймальної антени радіостанції по Ляпунову.*

**Ключові слова:** математичне моделювання, система радіозв'язку військового призначення, інформаційний обмін, стійкість по Ляпунову, радіомаскування, тензор електромагнітного поля.

### **Постановка проблеми у загальному вигляді**

Сьогодні на озброєнні у збройних силах розвинених у воєнному плані країн перебувають сучасні засоби та системи радіорозвідки [1-7], які з високою ефективністю спроможні викривати системи військового радіозв'язку, що розгортаються в інтересах різних ланок управління Збройних Сил України. Враховуючи те, що дії, спрямовані на зниження ефективності систем радіорозвідки противника є радіомаскуванням [8], можна зробити висновок про наявність об'єктивної суперечності між необхідним рівнем радіомаскування сучасних систем військового радіозв'язку та можливостями розглянутих систем радіозв'язку щодо забезпечення необхідного рівня радіомаскування. Для розв'язання цієї суперечності, враховуючи фізичне та моральне старіння наявного в Збройних Силах України парку засобів радіозв'язку, доцільним є створення системи радіозв'язку військового призначення (СР ВП), в якій би здійснювалося адаптивне управління рівнем радіомаскування СР ВП з метою забезпечення його необхідного рівня. Але у процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування виникає ризик погіршення стійкості зв'язку в СР ВП, що робить СР ВП неспроможною виконувати завдання за призначенням. Тому актуальним науковим завданням є математичне моделювання інформаційного обміну в СР ВП у процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування для управління стійкістю зв'язку і недопущення критичного її погіршення. Це наголошує на незмінно значній ролі математичних методів дослідження систем радіозв'язку військового призначення.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що стійкість зв'язку в СР ВП розглядається переважно з позиції стійкості до зовнішніх впливів на військовий зв'язок, а саме, впливу засобів радіоелектронної боротьби противника, засобів його вогневого ураження і т.ін. [9-19]. Для моделювання стійкості зв'язку застосовувалися різноманітні ймовірні моделі [10-13, 16, 19], доведення адекватності котрих вимагає наявності досить значних обсягів статистичних даних, або детерміновані моделі [9, 12, 14, 17, 18], що базуються на оперуванні скалярними потужностями, які подаються на передавальні антени радіостанцій СР ВП та потужностями, які знімаються з виходів приймальних антен радіостанцій ПРСР ВП. Але більш адекватним та фундаментальним був би розгляд не просто скалярних потужностей, а розгляд в цілому електромагнітного поля (ЕМП), що збуджується в цих антенах, та згідно з [20-21] подається антисиметричним 4-тензором ЕМП. Крім того, математичне моделювання інформаційного обміну в СР ВП для управління стійкістю зв'язку у процесі забезпечення необхідного рівня її радіомаскування у відомій літературі не виявлено.

### Формулювання мети статті

Розробити метод математичного моделювання інформаційного обміну в СР ВП на основі тензорного числення для управління стійкістю зв'язку у процесі забезпечення необхідного рівня її радіомаскування, розглядаючи в якості стійкості зв'язку стійкість динаміки 4-тензору ЕМП по Ляпунову.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Розглянемо кінцевий обсяг операційного району, в якому розгорнуто СР ВП, і для спрощення подальших обчислень будемо вважати, що операційний район має форму прямокутного паралелепіпеда, які відповідно складають  $X$  – по фронту, км;  $Y$  – у глибину, км;  $Z$  – по висоті, км. ЕМП, що створюється передавальною радіостанцією СР ВП з поточними координатами  $(x_\epsilon, y_\epsilon, z_\epsilon)$  в обсязі приймальної антени радіостанції з поточними координатами  $(x_n, y_n, z_n)$  в момент часу  $t$ , згідно з [20], є 4-тензорним полем другого рангу, що подається антисиметричним 4-тензором  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$  ЕМП:

$$F_{[\mu\nu]} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu}, \quad (1)$$

де  $A_\mu = (A_0, A_1, A_2, A_3) = (\varphi, \mathbf{A})$  – 4-потенціал ЕМП в об'ємі приймальної антени;

$\varphi = A_0$  – скалярний потенціал ЕМП в об'ємі приймальної антени;

$\mathbf{A} = \mathbf{A}(A_1, A_2, A_3)$  – векторний потенціал ЕМП в об'ємі приймальної антени.

Тензор (1) також можна подати таким чином:

$$\mathbf{F}_{[\mu\nu]} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & (\partial_0 A_1 - \partial_1 A_0) & (\partial_0 A_2 - \partial_2 A_0) & (\partial_0 A_3 - \partial_3 A_0) \\ -(\partial_0 A_1 - \partial_1 A_0) & 0 & (\partial_1 A_2 - \partial_2 A_1) & (\partial_1 A_3 - \partial_3 A_1) \\ -(\partial_0 A_2 - \partial_2 A_0) & -(\partial_1 A_2 - \partial_2 A_1) & 0 & (\partial_2 A_3 - \partial_3 A_2) \\ -(\partial_0 A_3 - \partial_3 A_0) & -(\partial_1 A_3 - \partial_3 A_1) & -(\partial_2 A_3 - \partial_3 A_2) & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & E_x & E_y & E_z \\ -E_x & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де  $E_k (k=1,2,3)$  – вектор напруженості електричного поля в об'ємі приймальної антени радіостанції;

$B_k$  – вектор магнітної індукції в об'ємі приймальної антени радіостанції.

Отримати потенціали ЕМП в об'ємі приймальної антени радіостанції можна з системи рівнянь (3) [20]:

$$\Delta \mathbf{A} - \frac{\epsilon_\epsilon \mu_\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\frac{4\pi \mu_\epsilon}{c} \mathbf{j}_\epsilon + \nabla \left( \nabla \mathbf{A} + \frac{\epsilon_\epsilon \mu_\epsilon}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right), \quad (3)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{4\pi}{\epsilon_\epsilon} \rho_\epsilon - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \mathbf{A})$$

де  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор набла (Гамільтона);

$\Delta = \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор Лапласа;

- $\epsilon_e$  – діелектрична проникність передавальної антени;  
 $\mu_e$  – магнітна проникність передавальної антени;  
 $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль;  
 $\mathbf{j}_e$  – щільність струму в об'ємі передавальної антени;  
 $\rho_e$  – щільність заряду в об'ємі передавальної антени.

Тоді компоненти векторів напруженості електричного поля та магнітної індукції в об'ємі приймальної антени можна отримати з рівнянь (4) [20]:

$$\mathbf{B} = [\nabla \mathbf{A}]$$

$$\mathbf{E} = -\Delta \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}. \quad (4)$$

Також можливо отримати співвідношення між амплітудою напруженості електричного поля в об'ємі приймальної антени, та характеристиками радіостанції:

$$E_n^2 = \frac{S_{\text{об}} \eta_e \sqrt{\mu_n / \epsilon_n} L}{\lambda^2 \left( (x_n - x_e)^2 + (y_n - y_e)^2 + (z_n - z_e)^2 \right)} W_e, \quad (5)$$

де  $S_{\text{об}}$  – дійсна площа передавальної антени;

$\eta_e$  – коефіцієнт корисної дії антено-фідерного тракту передавальної антени;

$\mu_n$  – магнітна проникність приймальної антени;

$\epsilon_n$  – діелектрична проникність передавальної антени;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$L$  – ослаблення електромагнітної хвилі в середовищі операційного району;

$W_e$  – потужність, що подається на передавальну антену.

Таким чином, компоненти тензору ЕМП в об'ємі приймальної антени залежать від характеристик радіостанцій:  $F_{[\mu\nu]} = F_{[\mu\nu]}(S_{\text{об}}, \eta_e, \mu_n, \epsilon_n, \lambda, W_e, x_n, y_n, z_n, x_e, y_e, z_e)$ . У процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування СР ВП будуть корегуватися значення характеристик радіостанцій, що призведе до деформації ЕМП в об'ємі приймальної антени. Отримаємо тензор деформації ЕМП в об'ємі приймальної антени у процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування. Для цього виконаємо симетрування [21] 4-тензора ЕМП і отримаємо такий симетричний тензор  $\mathbf{F}_{(\mu\nu)}$ :

$$\mathbf{F}_{(\mu\nu)} = \begin{pmatrix} 2\partial_0 A_0 & (\partial_0 A_1 + \partial_1 A_0) & (\partial_0 A_2 + \partial_2 A_0) & (\partial_0 A_3 + \partial_3 A_0) \\ (\partial_0 A_1 + \partial_1 A_0) & 2\partial_1 A_1 & (\partial_1 A_2 + \partial_2 A_1) & (\partial_1 A_3 + \partial_3 A_1) \\ (\partial_0 A_2 + \partial_2 A_0) & (\partial_1 A_2 + \partial_2 A_1) & 2\partial_2 A_2 & (\partial_2 A_3 + \partial_3 A_2) \\ (\partial_0 A_3 + \partial_3 A_0) & (\partial_1 A_3 + \partial_3 A_1) & (\partial_2 A_3 + \partial_3 A_2) & 2\partial_3 A_3 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

З розгляду 4-тензора (6) видно, що в ньому співвідношення між частковими похідними 4-потенціалу  $\mathbf{A}_\mu$  вже інші, ніж в (2) і не відповідають співвідношенням для електричного та магнітного поля. У зв'язку з цим встановимо сутність компонентів симетричного 4-тензора  $\mathbf{F}_{(\mu\nu)}$ . Симетричний 4-тензор (6) можна розкласти на 4-тензор  $\mathbf{G}_{(\mu\nu)}$ :

$$\mathbf{G}_{(\mu\nu)} = \begin{pmatrix} 2\partial_0 A_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\partial_1 A_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2\partial_2 A_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\partial_3 A_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} G_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

та 4-тензор  $\mathbf{D}_{(\mu\nu)}$ :

$$\mathbf{D}_{(\mu\nu)} = \begin{pmatrix} 0 & (\partial_0 A_1 + \partial_1 A_0) & (\partial_0 A_2 + \partial_2 A_0) & (\partial_0 A_3 + \partial_3 A_0) \\ (\partial_0 A_1 + \partial_1 A_0) & 0 & (\partial_1 A_2 + \partial_2 A_1) & (\partial_1 A_3 + \partial_3 A_1) \\ (\partial_0 A_2 + \partial_2 A_0) & (\partial_1 A_2 + \partial_2 A_1) & 0 & (\partial_2 A_3 + \partial_3 A_2) \\ (\partial_0 A_3 + \partial_3 A_0) & (\partial_1 A_3 + \partial_3 A_1) & (\partial_2 A_3 + \partial_3 A_2) & 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & K_x & K_y & K_z \\ K_x & 0 & L_z & L_y \\ K_y & L_z & 0 & L_x \\ K_z & L_y & L_x & 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Спираючись на [22], можна зробити висновок, що 4-тензор  $\mathbf{G}_{(\mu\nu)}$  (7) описує об'ємні деформації розтягування/стискання, а 4-тензор  $\mathbf{D}_{(\mu\nu)}$  (8) описує деформації зсуву поля 4-потенціалу  $\mathbf{A}_\mu$  у процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування СР ВП. Компоненти тензора  $\mathbf{D}_{(\mu\nu)}$  у тривимірному просторі можна подати у вигляді компонентів двох векторів: полярного вектора  $\mathbf{K}_k$ , що подає деформацію зсуву в трьох площинах з часовою та просторовими осями координат, і вектору  $\mathbf{L}_k$ , що подає деформацію зсуву в трьох площинах з просторовими осями координат. З урахуванням їх особливостей, цим векторам можна дати назву:  $\mathbf{K}_k$  – вектор просторово-часової деформації за рахунок радіомаскування,  $\mathbf{L}_k$  – вектор просторової деформації за рахунок радіомаскування.

Знайдемо рівняння зв'язку між компонентами симетричного 4-тензора деформації ЕМП  $\mathbf{F}_{(\mu\nu)}$  (6) і компонентами тензора ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$  (2). Оскільки 4-тензор  $\mathbf{F}_{(\mu\nu)}$  є симетричним, то з його компонентів достатньо розглянути лише незалежні. Записавши часткові похідні за часом і простором цих компонентів тензора  $\mathbf{F}_{(\mu\nu)}$ , можна отримати вихідні співвідношення, з яких за аналогією з умовами Сен-Венана та рівняннями Бельтрамі [22] для суцільних середовищ отримуються шукані диференціальні рівняння зв'язку:

$$\partial_x \partial_x G_t - \partial_t \partial_t G_x = 2 \partial_x \partial_t E_x \quad (9)$$

$$\partial_t \partial_t G_y - \partial_y \partial_y G_t = 2 \partial_y \partial_t E_y \quad (10)$$

$$\partial_t \partial_t G_z - \partial_z \partial_z G_t = 2 \partial_z \partial_t E_z \quad (11)$$

$$\partial_z \partial_z G_y - \partial_y \partial_y G_z = 2 \partial_y \partial_z B_x \quad (12)$$

$$\partial_x \partial_x G_z - \partial_z \partial_z G_x = 2 \partial_x \partial_z B_y \quad (13)$$

$$\partial_y \partial_y G_x - \partial_x \partial_x G_y = 2 \partial_y \partial_x B_z \quad (14)$$

$$\partial_x K_z + \partial_x E_z = \partial_t L_y + \partial_t B_y \quad (15)$$

$$\partial_y K_x + \partial_y E_x = \partial_t L_z + \partial_t B_z \quad (16)$$

$$\partial_z K_y + \partial_z E_y = \partial_t L_x + \partial_t B_x \quad (17)$$

$$\partial_x K_y + \partial_x E_y = \partial_t L_z + \partial_t B_z \quad (18)$$

$$\partial_y K_z + \partial_y E_z = \partial_t L_x + \partial_t B_x \quad (19)$$

$$\partial_z K_x + \partial_z E_x = \partial_t L_y + \partial_t B_y \quad (20)$$

$$\partial_z L_y + \partial_z B_y = \partial_x G_z \quad (21)$$

$$\partial_x L_z + \partial_x B_z = \partial_y G_x \quad (22)$$

$$\partial_y L_x + \partial_y B_x = \partial_z G_y \quad (23)$$

$$\partial_y L_z + \partial_y B_z = \partial_x G_y \quad (24)$$

$$\partial_z L_x + \partial_z B_x = \partial_y G_z \quad (25)$$

$$\partial_x L_y + \partial_x B_y = \partial_z G_x \quad (26)$$

$$\partial_y K_x - \partial_y E_x = \partial_x K_y - \partial_x E_y \quad (27)$$

$$\partial_z K_x - \partial_z E_x = \partial_x K_z - \partial_x E_z \quad (28)$$

$$\partial_z K_y - \partial_z E_y = \partial_y K_z - \partial_y E_z \quad (29)$$

$$\partial_y L_y - \partial_y B_y = \partial_z L_z + \partial_z B_z \quad (30)$$

$$\partial_x L_x - \partial_x B_x = \partial_y L_y + \partial_y B_y \quad (31)$$

$$\partial_z L_z - \partial_z B_z = \partial_x L_x + \partial_x B_x \quad (32)$$

$$\partial_x K_x + \partial_x E_x = \partial_t G_x \quad (33)$$

$$\partial_y K_y + \partial_y E_y = \partial_t G_y \quad (34)$$

$$\partial_z K_z + \partial_z E_z = \partial_t G_z \quad (35)$$

$$\partial_t K_x - \partial_t E_x = \partial_x G_t \quad (36)$$

$$\partial_t K_y - \partial_t E_y = \partial_y G_t \quad (37)$$

$$\partial_t K_z - \partial_t E_z = \partial_z G_t \quad (38)$$

В теорії ЕМП, при розгляді його в потенціалах, для спрощення рівнянь застосовують калібрування Кулона і Лоренца.

$$\nabla \mathbf{A} + \frac{\varepsilon \mu}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \mathbf{A} = 0$$

У випадку, що розглядається, члени цих калібрувальних умов являтимуть собою компоненти 4-тензора розтягування/стискання  $\mathbf{G}_{[\mu\nu]}$  й описуватимуть об'ємну деформацію ЕМП у процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування СР ВП, а сума цих компонентів буде першим інваріантом 4-тензора  $\mathbf{G}_{[\mu\nu]}$ . При цьому виключення з рівнянь компонентів 4-тензора  $\mathbf{G}_{[\mu\nu]}$  означатиме виключення з рівнянь об'ємної деформації ЕМП.

Тепер введемо поняття стійкості зв'язку по Ляпунову [23] у процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування. Припустимо, що 4-тензор ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$  має 6 ступенів свободи:

$$S_{\partial\theta}, \eta_{\theta}, \boldsymbol{\mu}_n, \boldsymbol{\varepsilon}_n, \lambda, W, \quad (39)$$

які його визначають. Розглядаючи змінні (39) як функції часу, перші похідні від них позначимо так:

$$S'_{\partial\theta}, \eta'_{\theta}, \boldsymbol{\mu}'_n, \boldsymbol{\varepsilon}'_n, \lambda', W'. \quad (40)$$

Ці функції мають відповідати деяким диференціальним рівнянням другого порядку [23]. Нехай для цих рівнянь знайдено яке-небудь часткове рішення:

$$S_{\partial\theta} = f_1(t), \eta_{\theta} = f_2(t), \boldsymbol{\mu}_n = f_3(t), \boldsymbol{\varepsilon}_n = f_4(t), \lambda = f_5(t), W_{\theta} = f_6(t).$$

Такому частковому решению буде відповідати деяка визначена динаміка 4-тензора ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$ . Порівнюючи її у відомому співвідношенні з іншими, можливими для неї при тих самих заходах щодо забезпечення необхідного рівня радіомаскування, цю динаміку будемо називати незбуреною в процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування СР ВП, а решту, з якими вона порівнюється, – збуреними у процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування СР ВП.

Розуміючи під  $t_0$  деякий даний момент часу, назвемо значення показників (39–40) в якій-небудь динаміці 4-тензора ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$  через  $S_{\partial\theta_0}, \eta_{\theta_0}, \boldsymbol{\mu}_{n_0}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n_0}, \lambda_0, W_{\theta_0}, S'_{\partial\theta_0}, \eta'_{\theta_0}, \boldsymbol{\mu}'_{n_0}, \boldsymbol{\varepsilon}'_{n_0}, \lambda'_0, W'_{\theta_0}$ .

Нехай

$$\begin{aligned} S_{\partial\theta_0} &= f_1(t) + \alpha_1, \eta_{\theta_0} = f_2(t) + \alpha_2, \boldsymbol{\mu}_{n_0} = f_3(t) + \alpha_3, \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{n_0} &= f_4(t) + \alpha_4, \lambda_0 = f_5(t) + \alpha_5, W_{\theta_0} = f_6(t) + \alpha_6, \\ S'_{\partial\theta_0} &= f'_1(t) + \alpha'_1, \eta'_{\theta_0} = f'_2(t) + \alpha'_2, \boldsymbol{\mu}'_{n_0} = f'_3(t) + \alpha'_3, \\ \boldsymbol{\varepsilon}'_{n_0} &= f'_4(t) + \alpha'_4, \lambda'_0 = f'_5(t) + \alpha'_5, W'_{\theta_0} = f'_6(t) + \alpha'_6, \end{aligned}$$

де  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_4, \alpha'_5, \alpha'_6$  – дійсні константи.

Завданням цих констант, які будемо називати збуреннями, визначиться збурена динаміка 4-тензора ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$ . Будемо передбачати, що їм можна надавати будь-які достатньо малі значення.

Говорячи про збурені динаміки 4-тензора ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$ , близькі до незбуреної, будемо розуміти динаміки, для яких збурення достатньо малі.

Нехай  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  – які-небудь безперервні дійсні функції величин

$$S_{\partial\theta_0}, \eta_{\theta_0}, \boldsymbol{\mu}_{n_0}, \boldsymbol{\varepsilon}_{n_0}, \lambda_0, W_{\theta_0}, S'_{\partial\theta_0}, \eta'_{\theta_0}, \boldsymbol{\mu}'_{n_0}, \boldsymbol{\varepsilon}'_{n_0}, \lambda'_0, W'_{\theta_0}.$$

Для незбуреної динаміки вони перетворюються на деякі відомі функції  $t$ , які позначимо через  $F_1, F_2, \dots, F_n$ . Для збуреної динаміки вони будуть функціями величин

$$t, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_4, \alpha'_5, \alpha'_6.$$

Коли всі  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_4, \alpha'_5, \alpha'_6$  дорівнюють нулю, величини

$$Q_1 - F_1, Q_2 - F_2, \dots, Q_n - F_n$$

будуть дорівнювати нулю для будь-якого  $t$ .

Але, якщо константи  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_4, \alpha'_5, \alpha'_6$  не нульові, а передбачаються всі нескінченно малими, то виникає питання щодо можливості призначення таких нескінченно малих меж для величин  $Q_s - F_s$ , котрих останні б ніколи не перевищили за числовими значеннями.

Розв'язання цього питання залежить як від характеру незбуреної динаміки 4-тензору ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$ , так і від вибору функцій  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  і моменту часу  $t_0$ . При певному виборі останніх, відповідь на це питання буде, відповідно, характеризувати у відомому співвідношенні незбурену динаміку 4-тензору ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$ , визначаючи собою ту його властивість, котру будемо називати стійкістю зв'язку по Ляпунову в ПРСР ВП, і протилежну йому – нестійкістю.

За аналогією з [23] будемо займатися лише випадками, коли вирішення цього питання не залежить від вибору моменту  $t_0$ , в якому здійснюються збурення. Тому прийнемо таке визначення:

Нехай  $N_1, N_2, \dots, N_n$  – довільно задані позитивні числа. Якщо при будь-яких  $N_s$ , якими б малими вони не були, можуть бути обрані позитивні числа  $\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4, \Lambda_5, \Lambda_6, \Lambda'_1, \Lambda'_2, \Lambda'_3, \Lambda'_4, \Lambda'_5, \Lambda'_6$  так, щоб при будь-яких дійсних  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha'_1, \alpha'_2, \alpha'_3, \alpha'_4, \alpha'_5, \alpha'_6$ , які відповідають умовам

$$|\alpha_j| \leq \Lambda_j, |\alpha'_j| \leq \Lambda'_j,$$

і при будь-якому  $t$ , що перевищує  $t_0$ , виконуються нерівності

$$|Q_1 - F_1| < N_1, |Q_2 - F_2| < N_2, \dots, |Q_n - F_n| < N_n,$$

то незбурена динаміка 4-тензора ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$  по відношенню до величин  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  стійка, у протилежному випадку – нестійка.

Особливістю такого подання буде те, що динаміка 4-тензора ЕМП  $\mathbf{F}_{[\mu\nu]}$  в одній системі координат може бути нестійкою, в той час як в деякій іншій системі координат – стійкою.

### Висновки з дослідження і перспективи подальших досліджень у цьому напрямку

Запропонований метод математичного моделювання інформаційного обміну в СР ВП на основі тензорного числення для управління стійкістю зв'язку в процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування. В якості стійкості зв'язку розглядається стійкість динаміки 4-тензора ЕМП по Ляпунову в об'ємі приймальної антени радіостанції СР ВП. Показано, що в процесі забезпечення необхідного рівня радіомаскування виникають деформації ЕМП, отриманий тензор деформації ЕМП та диференціальні рівняння зв'язку між компонентами антисиметричного 4-тензора ЕМП в об'ємі приймальної антени радіостанції СР ВП та тензора деформації ЕМП. Вказано на зв'язок між компонентами вищезазначених тензорів та характеристиками радіостанцій СР ВП, що дозволяє формулювати оптимізаційне завдання із забезпечення максимального рівня радіомаскування при мінімально припустимій стійкості зв'язку в СР ВП.

В майбутніх роботах доцільні постановка та розв'язання означеного оптимізаційного завдання та розроблення відповідного програмного забезпечення для автоматизованої системи управління СР ВП.

**Список використаних джерел**

1. *Оружие и технологии России: энциклопедия. XXI век в 13 т. [Текст] / под ред. зам. Пред. Прав-ва РФ – Министра обороны РФ С. Иванова. – М. : Изд. дом «Оружие и технологии», 2006. – 695 с. – Т. XIII: Системы управления, связи и радиоэлектронной борьбы, 2006.*
2. *Фиолентов А. Французский авиационный комплекс радиоэлектронной разведки SARIG-NG [Текст] / А. Фиолентов // Зарубежное военное обозрение, 2002. – № 4. – С. 44–46.*
3. *Фароский А. Средства радиоэлектронной войны ВМС Франции [Текст] / А. Фароский // Зарубежное военное обозрение, 2001. – № 5–6. – С. 75–82.*
4. *Стрелецкий А. Мобильный автоматизированный комплекс радиоразведки сухопутных войск США [Текст] / А. Стрелецкий // Зарубежное военное обозрение, 2001. – № 5–6. – С. 40–42.*
5. *Стрелецкий А. Система радиоэлектронной разведки сухопутных войск США «Гардрейл коммон сенсор» [Текст] / А. Стрелецкий // Зарубежное военное обозрение, 2001. – № 9. – С. 23–26.*
6. *Кондратьев А. Перспективный комплекс РРТР и РЭВ сухопутных войск США «Профет» [Текст] / А. Кондратьев // Зарубежное военное обозрение, 2008. – № 7. – С. 37–41.*
7. *Стрелецкий А. Американский перспективный наземный комплекс ведения радиоэлектронной войны «Вулфпак» [Текст] / А. Стрелецкий // Зарубежное военное обозрение, 2002. – № 10. – С. 27–28.*
8. *Военный энциклопедический словарь [Текст] [Пред. гл. ред. комиссии Маршал Советского Союза С.Ф. Ахромеев]. – М. : Воениздат, 1986 – 863 с.*
9. *Харкевич А.А. Очерки общей теории связи [Текст] / А.А. Харкевич. – М. : Госиздат-во технико-теоретической лит-ры, 1955. – 268 с.*
10. *Финк Л.М. Общая теория связи [Текст] / Л.М. Финк, В.И. Коржик, Д.Л. Бураченко и др.; под ред. Л.М. Финка. – Л. : Военная академия связи, 1970. – 411 с.*
11. *Захаров Г.П. Методы исследования систем связи [Текст] / Г.П. Захаров. – Л. : Военная академия связи, 1965. – 428 с.*
12. *Шаров А.Н. Адаптивные автоматизированные системы военной связи [Текст] / А.Н. Шаров, Ю.П. Килимник, Е.В. Лебединский, В.К. Прохоров; под ред. А.Н. Шарова. – Л. : Военная академия связи, 1978. – 284 с.*
13. *Туник А.Т. Военные системы радиосвязи [Текст] / А.Т. Туник, Ю.П. Килимник, В.К. Прохоров и др.; под ред. А.Т.Туника. – Л. : Военная академия связи, 1985. – 576 с.*
14. *Игнатов В.В. Военные системы радиосвязи [Текст]: в 2 ч. / В.В. Игнатов, В.Ф. Пивоваров и др.; под. ред. В.В. Игнатова. – Л. : Военная академия связи, 1989. – 176 с. – Ч. 2: Средства, комплексы радиосвязи, радиоцентры и основы их боевого применения, 1989.*
15. *Попов К.Н. Пути повышения надежности военной радиосвязи [Текст] / К.Н. Попов, В.К. Прохоров, А.Н. Шаров. – Л. : Военная академия связи, 1974. – 196 с.*
16. *Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости [Текст] / В.А. Котельников. – М. : Гос. энергоиздат-во, 1956. – 153 с.*
17. *Альперт Я.Л. Распространение радиоволн [Текст] / Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург, Е.Л. Фейнберг. – М. : Гос. тех. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1953. – 883 с.*
18. *Elmasry, George F. Tactical wireless communications and networks: design concepts and challenges [Text] / George F. Elmasry. – NJ, USA: XPRT Solutions, Inc., A DSCI Company. Wiley, 2012. – 301 p.*
19. *Kelleher James J. Tactical communications network modelling and reliability analysis: overview [Text] / James J. Kelleher. – Adelphi, Maryland:Survivability management office U.S. Army LABC0M, 2001. – 92 p.*
20. *Ландау Л.Д. Краткий курс теоретической физики [Текст]: в 3 кн. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М. : Наука: Глав. ред. физ.-мат. лит., 1969. – 271 с. – Кн.1: Механика. Электродинамика, 1969.*
21. *Акивис М.А. Тензорное исчисление [Текст] / М.А. Акивис, В.В. Гольдберг. – М. : Изд-во «Наука», Глав. ред. физ.-мат. лит-ры, 1972. – 351 с.*

22. Лейбензон Л.С. Курс теории упругости [Текст] / Л. С. Лейбензон. – М. : ОГИЗ, 1947. – 465 с.

23. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения [Текст] / А.М. Ляпунов. – М. : Госиздат-во технико-теоретической лит-ры, 1950. – 473 с.

**Рецензент:** Бачинський В.В., к.т.н., с.н.с. Військова академія (м. Одеса).

**МЕТОД МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО  
ОБМЕНА В СИСТЕМЕ РАДИОСВЯЗИ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕНЗОРНОГО  
ИСЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СТОЙКОСТЬЮ СВЯЗИ В ПРОЦЕССЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
НЕОБХОДИМОГО УРОВНЯ ЕЕ РАДИОМАСКИРОВКИ**

А.П. Волобуев, И.Ю. Волобуева, А.Ю. Коркин

*В статье предложен метод математического моделирования информационного обмена в системе радиосвязи военного назначения на основе тензорного исчисления для управления устойчивостью связи в процессе обеспечения необходимого уровня ее радиомаскировки. В качестве устойчивости связи рассматривается устойчивость динамики 4-тензора электромагнитного поля в объеме приемной антенны радиостанции по Ляпунову.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, система радиосвязи военного назначения, информационный обмен, устойчивость по Ляпунову, тензор электромагнитного поля.

**THE METHOD OF MATHEMATICAL MODELING OF INFORMATION EXCHANGE IN A  
WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM FOR MILITARY PURPOSES BASED ON TENSOR  
CALCULUS FOR RESISTANCE MANAGEMENT IN THE PROCESS OF COMMUNICATION TO  
ENSURE THE NECESSARY LEVEL OF ITS RADIO CAMOUFLAGE**

*A. Volobuev, I. Volobueva, O. Korkin*

*In the article the method of mathematical modeling of an information exchange in military radiosystem based on tensor calculus for sustainability communication management in the process of securing the required level of its radio camouflage was offered. As the stability of communication is considered dynamics Lyapunov stability 4-tensor of the electromagnetic field in the volume of the radio receiving antenna.*

**Keywords:** mathematical modeling, military radiosystem, information exchange, Lyapunov stability, electromagnetic field tensor.