

УДК 519.7

Яценко В. О., Кочкодан О. І.

МОДЕЛЮВАННЯ І КЕРУВАННЯ ПОКАЗНИКАМИ ЛЯПУНОВА У ГРАТЦІ ЗВ'ЯЗАНИХ ОСЦИЛЯТОРІВ

У статті описано метод моделювання та керування показниками Ляпунова в гратці на основі дискретних відображень. Розроблено метод для динамічної емуляції моделі гратки зв'язаних осциляторів складної просторової динаміки в епілептичному мозку, який виявляє характерні просторово-часові зміни, що спостерігаються при наблизненні приступу епілепсії.

Ключові слова: моделювання, оптимізація, показники Ляпунова, керування, хаос, генератор коливань.

1. Вступ

Наявність хаосу докладно продемонстрована у природничих і технічних системах. Протягом останніх кількох десятиліть керування хаосом привернуло підвищену увагу через його широке застосування у фізичних, хімічних і біологічних системах. Важливою галуззю застосування методів керування хаосом є проблема лікування неврологічних розладів таких, як епілепсія. Характеристика електроенцефалограми (ЕЕГ) через вимірювання хаотичності була дуже корисною для отримання інформації про динамічний стан епілептичного мозку. Дослідження епілепсії у людей [Iasemidis, 1990; Iasemidis, 1991; Iasemidis, 2004, Yatsenko, 2004] і тварин [Nair, 2004] показують, що виникнення спонтанних приступів корелює з переходом мозку до більш впорядкованого стану. Це було продемонстровано за допомогою змін в основних властивостях системи (таких, як показники Ляпунова), що обчислені з ЕЕГ, записаної у кількох ділянках мозку. Раніше висловлено припущення, що такі просторово-часові зміни відбуваються через самоорганізацію епілептичного мозку, яка переводить його від хаосу до порядку. Більш того, приступ епілепсії вважається механізмом «перевантаження» мозку — від порядку до хаосу [Iasemidis, 1996].

Підтримка хаосу в таких біологічних систем вкрай бажана через його наслідки з терапевтичної точки зору або з точки зору керування. Зовсім недавно «некерована» схема, де метою є підтримка хаосу, була темою великої кількості досліджень, результатом яких стала розробка кількох алгоритмів [Ramaswamy, 1998; Wang, 2000; Morgu, 2003]. Проектування й адаптація таких алгоритмів керу-

вання хаосом у динамічних системах, які мають надзвичайно складну динаміку (наприклад, мозок), є нетривіальним завданням.

Біологічні системи мають адаптивний характер за своєю природою і тому потребують адаптивних методів керування [Glass, 1988]. Недавні дослідження епілепсії показали, що для ефективної модуляції динаміки мозку потрібні нові методи керування, які спираються на стійкі прогнозування й адаптивні методи оптимізації [Iasemidis, 2000; Yatsenko, 2004; Pardalos, 2004; Iasemidis, 2003]. Тут увагу зосереджено на теоретичній проблемі керуваності системи, яка показала таку саму властивість відображення зміни стану в системах нейронів, як і в експоненті Ляпунова. Застосування спектра Ляпунова у реальному світі містять можливість керування конвергенцією та дивергенцією величини як кількісно-статистичного показника Т-індексу між різними зонами епілептичного мозку. Як було показано, Т-індекс може бути прогнозованим із вимірів сприйнятливої стану мозку [Yatsenko, 2004; Kaneko, 1984]. Проблема керуваності показниками Ляпунова можна переформулювати як завдання оптимізації, в якому оцінено параметри керування завдяки мінімізації функції помилки, обчисленої з глобальних показників Ляпунова.

2. Керування хаосом у гратках зв'язаних осциляторів

2.1. Гратки зв'язаних осциляторів. Гратка зв'язаних осциляторів (ГЗО) — це N -вимірна мережа пов'язаних елементів, де кожен елемент еволюціонує з часом по відображенню (чи рекурентному рів-

нянню) дискретної форми:

$$X^{k+1} = F(X^k), \quad (1)$$

де X^k позначає значення поля (N -мірний вектор) у зазначений час k . У разі глобально-зв'язаних осциляторів з глобальними (середніми) коефіцієнтами зчеплення ε динаміка може бути переписана у вигляді:

$$x_n^{k+1} = (1 - \varepsilon)f_n[x_n^k] + \frac{\varepsilon}{L} \sum_{j=1}^L f_j[x_j^k], \quad (2)$$

де n і j — індекси вузлів ґратки ($j \neq n$). Значення L вказує, скільки в середньому є сусідів і його іноді називають *координативним числом*. Локальні N -вимірні осцилятори вважаються хаотичними. Повністю синхронний хаотичний стан можливий за цією моделлю, коли відповідні N -вимірні множини є залученими або стабільними. Критерій стійкості цієї синхронізації множин отримано в [Ding, 1997]. Подальший аналіз стабільності синхронізованих періодичних орбіт у ґратках зв'язаних осциляторів зроблено в [Amritkar, 1991]. Змінюючи ε і L , можна змінити масштаб просторової кореляції від систем із локальними взаємодіями до систем із дальніми взаємодіями. Ці системи зазвичай мають просторово і/або часово-хаотичну поведінку, керування якою дуже бажане через його потенційні застосування у реальних умовах. Деякі стратегії запропоновано для керування колективною просторово-часовою динамікою таких систем. У цій статті спочатку описано адаптивні стратегії керування зі зворотним зв'язком для систем ґраток зв'язаних осциляторів, а потім — метод оптимізації для вибору оптимальних параметрів зворотного зв'язку.

2.2. Оновлення моделі. Головною ідеєю керування динамічними системами є керування різкими і періодичними переходами між динамічними режимами роботи, які становлять основу нелінійних хаотичних систем. Деякі завдання, які повинні бути виконані під час керування просторово-часовою системою містять утворення специфічних просторово-часових шаблонів, стабілізацію поведінки, синхронізації/десинхронізації, придушення/посилення хаосу тощо. Мета цієї адаптивної стратегії зворотного зв'язку — керування деякими специфічними властивостями системи. Параметри керування, що застосовуються у зворотному зв'язку, пов'язані з кожною коміркою в структурі ґратки, побудованій на внутрішніх станах системи. Вхідний параметр керуваності U^* для системи може бути визначений так:

$$U^{*k} = G(\psi^{*k} - \psi^k), \quad (3)$$

де G — це жорсткість керування, а ψ^* і ψ відповідно, — очікувані й реальні значення властивостей системи. Цільове значення властивостей системи може бути постійним або змінним з часом за функцією. У разі багатовимірної системи ψ може бути глобальною властивістю системи або будь-якою властивістю окремих підсистем.

2.3. Оптимізація параметрів зворотного зв'язку. Надалі введемо функцію продуктивності, яка також може бути подана як функція помилки, наведена нижче рівнянням (4). Вона обчислює похибку в діапазоні від бажаного значення властивостей системи до обчисленого значення на кожному кроці часу. Мета оптимізації — мінімізація цієї похибки, вибираючи найоптимальніші параметри зворотного зв'язку в системі. При виборі середнього показника Ляпунова $\bar{\lambda}$ властивістю системи, за якою спостерігаємо, функція повинна бути мінімізована так:

$$\xi = \lambda^* - \bar{\lambda}^k, \quad (4)$$

де λ^* — бажане значення показника Ляпунова, і для ґратки зв'язаних осциляторів середній показник Ляпунова визначається як

$$\bar{\lambda}^k = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \lambda_n^k. \quad (5)$$

3. Алгоритми керування

3.1. Обчислення показників Ляпунова. Якщо завдання полягає в збереженні необхідного рівня хаотичності, природним вибором для керування властивостями керованої системи є показники Ляпунова. Глобальний показник Ляпунова для дискретної одновимірної системи $x^{k+1} = f(x^k)$ може бути визначений:

$$\lambda = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \ln \left| f'(x^k) \right|. \quad (6)$$

Для вивчення еволюції показників Ляпунова ґратки зв'язаних осциляторів, описаної рівнянням (2), введемо спочатку матрицю Якобі:

$$\varphi^k = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1^{k+1}}{\partial x_1^k} & \frac{\partial x_1^{k+1}}{\partial x_2^k} & \frac{\partial x_1^{k+1}}{\partial x_3^k} & \dots & \frac{\partial x_1^{k+1}}{\partial x_L^k} \\ \frac{\partial x_2^{k+1}}{\partial x_1^k} & \frac{\partial x_2^{k+1}}{\partial x_2^k} & \frac{\partial x_2^{k+1}}{\partial x_3^k} & \dots & \frac{\partial x_2^{k+1}}{\partial x_L^k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial x_L^{k+1}}{\partial x_1^k} & \frac{\partial x_L^{k+1}}{\partial x_2^k} & \frac{\partial x_L^{k+1}}{\partial x_3^k} & \dots & \frac{\partial x_L^{k+1}}{\partial x_L^k} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Показники Ляпунова системи обчислюються з власних чисел поданої вище матриці. Якщо власні числа $\varphi^k \in \{\Lambda_1^k, \Lambda_2^k, \Lambda_3^k, \dots, \Lambda_L^k\}$, то локальні показники Ляпунова визначено наступним чином

$$\lambda_n^k = \log |\Lambda_n^k|, \quad (n = 1, 2, \dots, L). \quad (8)$$

Теорема 1. Розглянемо системи, які описують рівнянням (1). Нехай φ позначає Якобіан F в X , і Λ_i визначає i -те власне число матриці $\phi_m = \varphi'(X_{m-1}) \dots \varphi'(X_1) \varphi'(X_0)$, де $X = X_0$ у часовому кроці $t=0$. Припустимо, що $\|\varphi'(X)\| \leq M$, де M — додатна константа, і що найменше власне число $[\varphi'(X)]^T \varphi'(X)$ задовольняє $\Lambda_{\min}([\varphi'(X)]^T \varphi'(X)) \geq \beta > 0$, де $\beta \leq M^2$ і $X \in \Omega$. Тоді для будь-якого $X_0 \in \Omega$ всі показники Ляпунова в X_0 розміщено всередині інтервалу $[0, 5 \ln \beta, \ln N]$.

3.2. Адитивне керування. Для системи, що описується рівнянням (1), стратегію керування реалізовано на наступних загальних динамічних рівняннях:

$$X^{k+1} = F(X^k) + U^k, \quad (9 \text{ а})$$

$$U^k = G(\lambda^* - \lambda^k). \quad (9 \text{ б})$$

Розглянемо логістичне відображення, визначене рівнянням:

$$x^{k+1} = \alpha x^k (1 - x^k). \quad (10)$$

Використовуючи рівняння (9), можемо переписати рівняння (10) як:

$$x^{k+1} = \alpha x^k (1 - x^k) + g(\lambda^* - \lambda^k), \quad (11)$$

де g визначає керування коефіцієнтом пружності для маятника. Тут шукане значення глобального показника Ляпунова є постійним, на відміну від змінної функції часу. Оптимальне значення керування параметром g повинно бути визначеним у будь-якій практичній реалізації цієї стратегії. Для ґратки зв'язаних осциляторів середній глобальний показник Ляпунова використано так, як описано в рівнянні (5).

3.3. Мультиплікативне керування. Розглянемо систему описану рівнянням (1) з додатково керованою змінною V . При цьому керування здійснюється шляхом зміни цієї змінної, використовуючи метод зворотного зв'язку. Розглянемо ґратки з керованими осциляторами:

$$X^{k+1} = F(X^k, U^k), \quad (12)$$

де V^k — мультиплікативне керування. Для ґратки з мультиплікативним керуванням необхідно вивчити завдання керованості. Припустимо, що ґратка містить тільки один осцилятор зі скалярним мультиплікативним керуванням, описаний наступним рівнянням:

$$X^k = F(X^{k-1}, U^{k-1}) = [A + BU^{k-1}]X^{k-1}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (13)$$

де X^k — вектор стану, U^{k-1} — скалярне керування, і A, B — матриці дійсних констант відповідних розмірів.

Якщо $\hat{\mathbb{R}}^n = \mathbb{R}^n - \{0\}$ n -вимірний простір з виключеними точками, тоді

$$X^k = \prod_{i=1}^k [A + U^i B] X^0 \equiv \gamma(X^0, U_k);$$

$$U_k = [U^1, \dots, U^k] \in \mathbb{R}^k. \quad (14)$$

Визначення 1. Ґратка називається керованою над $\hat{\mathbb{R}}^n$, якщо для будь-якого $X^1, X^2 \in \hat{\mathbb{R}}^n$ існують додатні цілі s і скінченна послідовність керування U^s такі, що $X^2 = \gamma(X^1, U^s)$, де γ дільник осцилятора.

Головний результат визначено у наступній теоремі.

Теорема 2. Система ґраток, визначена з (13), є керованою над $\hat{\mathbb{R}}^n$ тоді, коли існують додатні цілі P, Q такі, що для всіх $X \in \hat{\mathbb{R}}^n$ маємо:

$$(a) \|A^P X\| = \|X\|,$$

$$(б) \text{rank } H_Q(X) = n,$$

$$\text{де } H_Q(X) = [BA^{Q-1}X, ABA^{Q-2}X, \dots, A^{Q-1}BX].$$

Алгоритм керування зі зворотним зв'язком може бути описано рівняннями:

$$X^{k+1} = F(X^k, U^k), \quad (15 \text{ а})$$

$$U^{k+1} = U^k + R(\lambda^* - \lambda), \quad (15 \text{ б})$$

де R — постійний параметр. Ця схема, як і попередня, буде адаптивною в природі, тому що параметри, що визначають характер динаміки адаптуються до бажаної динаміки. Цей тип зворотного зв'язку також названо «динамічним керуванням зі зворотним зв'язком» у (6). Реалізація цієї стратегії керування демонструється і в одиночних, і в зв'язаних логістичних осциляторах, для яких спостережується властивість є середнім показником Ляпунова в остаточному випадку.

3.4. Адитивне і мультиплікативне керування.

Третя і заключна стратегія керування — це комбінація адитивного і мультиплікативного керування. Керування в цьому випадку впливає з двох попередніх схем і може бути описане наступною динамікою:

$$X^{k+1} = F(X^k, U^k) + G(\lambda^* - \lambda^k), \quad (16 \text{ а})$$

$$V^{k+1} = V^k + R(\lambda^* - \lambda). \quad (16 \text{ б})$$

3.5. Техніка генетичної оптимізації. Застосування методів оптимізації в керуванні динамічними системами передбачає зведення до мінімуму функції помилки, описаної в рівнянні (4). Мета оптимізації в наших прикладах — знаходження оптимального параметра жорсткості, що дає умовний мінімум функції помилки. Розглянемо мультиплікативну стратегію керування, як це описано в рівнянні (13). Визначимо лінійну нерівність $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$ і знайдемо ітеративно значення R , яке дає мінімум рівняння (4). Задача формулюється так:

$$\min_R \xi(R) \text{ subject to: } R_{\min} \leq R \leq R_{\max}. \quad (17)$$

Для розв'язку цього завдання оптимізації було використано оптимізаційні інструменти Matlab®. Послідовне квадратичне програмування (SQP) використовується для розв'язку цього завдання мінімізації. У цьому методі функція розв'язує підзавдання квадратичного програмування (QP) на кожній ітерації. Обчислення гессіана і лагранжіана оновлюється на кожній ітерації. Лінійний пошук здійснюється за допомогою оцінної функції. Для детальнішого пояснення оптимізації функції треба звернутися до документації Matlab® оптимізаційних інструментів стратегій мультиплікативного керування відповідно.

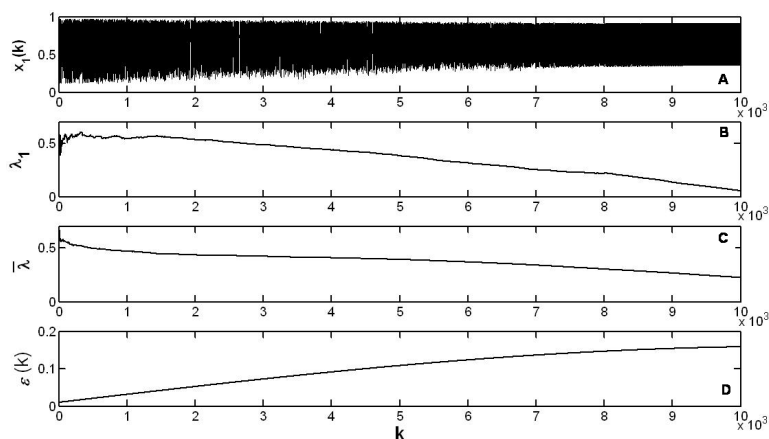


Рис. 1. А — амплітудний спектр як функція часу; В — профіль показника Ляпунова однієї комірки; С — середній показник Ляпунова профілю ($L = 5$) оцінений за п'ятьма комірками ГЗО; D — параметр ε як функція часу

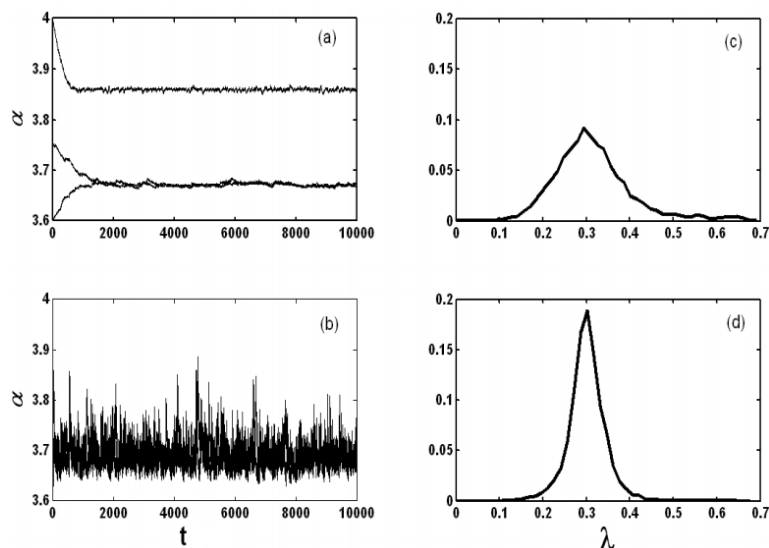


Рис. 2. Мультиплікативне керування: від параметра α залежно від кроку ітерації для $\lambda^* = 0, 3$, і жорсткості (а) $g = 0, 001$, і (b) $g = 0, 02$. Різні криві відповідають різним початковим α . Розподіл ймовірностей кінцевих кроків показників Ляпунова для $\alpha_0 = 4, 0$ і жорсткості (c) $g = 0, 001$ і (d) $g = 0, 01$

4. Чисельні й експериментальні значення

Експериментальні дослідження епілепсії у гризунів [Nair, 2004] використовували ЕЕГ, записану за допомогою 4–6 електродів, розташованих у лобовій і скроневій ділянках мозку тварин. Із цих міркувань обрано модель ГЗО із п'ятьма неідентичними логістичними осциляторами. Параметри системи $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ обрано випадковим чином як 3,9; 3,97; 3,95; 3,965 і 3,96. Величина ε змінювалася від значення 0,10 до 0,14 для вивчення динамічної поведінки в обох просторових і часових режимах. На рис. 1 показано зміни в просторово-часовій моделі у міру збільшення значення параметра ε . Для наочності тут показано тільки профілі амплітуди і показника Ляпунова в одній комірці (комірка 1). Решта комірок мають аналогічну схему. При збільшенні значення ε поступово, як показано на рис. 1 D, графік, зображений на рис. 1 A, стає більш впорядкованим, і можна побачити зменшення показників Ляпунова (розраховано як змінне середнє) за той самий час, припускаючи перехід у більш упорядкований стан, як показано на рис. 1 B. Рис. 1 C відтворює профіль середнього показника Ляпунова обчисленого за всіма 5 комірками у ГЗО. При збільшенні значення зв'язку можна спостерігати поступове зниження цього глобального значення.

На рис. 2 проілюстровано стратегію керування зі зворотним зв'язком, яка також називається «динамічне керування зворотного зв'язку». У [Nair, 2004] цей тип зв'язку описано для шуканого значення $\lambda^* = 0,3$. Отже, може бути кілька значень керованих параметрів α (відповідно до кількох різних атракторів), які дають необхідне значення показника Ляпунова. Фактичне значення параметра керування, залежить від жорсткості керування і початкових умов. Коливання параметра керування пропорційне значенню жорсткості: він прямує до єдиного значення для малих жорсткостей і для нього проявляються великі коливання для великих значень жорсткості.

5. Висновки

Отже, тут запропоновано метод оптимізації для керування просторово-часовою динамікою в системах ґраток зв'язаних осциляторів. Показано, що метод умовної оптимізації може бути використано для мінімізації функції помилки і для вибору оптимальних параметрів керування. Також показано, що керування зі зворотним зв'язком може бути застосоване до систем із прихованими змінними і, отже, може бути достатньо корисним у керуванні достатньо складними системами такими,

як епілептичний мозок, де не всі змінні відомі. Тут запропоновано метод для обчислення скінчених за часом показників Ляпунова для експериментальних часових рядів за допомогою чисельного моделювання для наближення локального Якобіана системи на кожному кроці часу. Це в поєднанні з чисельно-експериментальним підходом до обчислень показників Ляпунова застосовно до будь-якої фізичної системи, яка може бути чисельно апроксимованою.

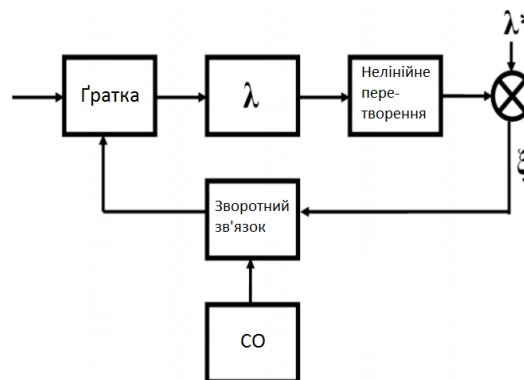


Рис. 3. Пропонований адаптивний алгоритм навчання для ґратки зв'язаних осциляторів за допомогою оптимізованого управління зі зворотним зв'язком для емуляції цільової динаміки будь-якої складної мережі. СО належить до умовної оптимізації блоку. ξ посилається на помилку, згенеровану з нелінійно трансформованими оцінками локальних показників Ляпунова і бажаних показників Ляпунова

Успішне застосування методів керування для динаміки мозку повинно бути спрямоване принаймні на наступні елементи: (I) вибір змінних для вхідних даних, вихідних даних і бажаної поведінки, (II) побудова динамічних моделей сторін мозку та їх взаємодії, (III) побудова відповідних гіпотез спрощення у встановленні меж продуктивності.

У запропонованому алгоритмі навчання система ґраток зв'язаних осциляторів може бути використана для моделювання динамічної еволюції показників Ляпунова у складній системі (рис. 3). Алгоритм містить генерування функції помилки між профілем бажаного показника Ляпунова складної системи і деякі нелінійні перетворення ґратки значень показників Ляпунова. Похибка використовується для генерування оптимізованого зворотного зв'язку вхідних даних для ґратки. Такий алгоритм навчання може бути використаний у розробці реалістичної моделі складної динаміки системи, що зробить її більш корисною під час вивчення й керування.

Список літератури

1. Iasemidis L. D. Phase Space Topography of the Electroencephalogram and the Lyapunov Exponent in Partial Seizures / L. D. Iasemidis, J. C. Sackellares, H. P. Zaveri, W. J. Williams // *Brain Topography*. — 1990. — Vol. 2. — P. 187–201.
2. Iasemidis L. D. The Temporal Evolution of the Largest Lyapunov Exponent on the Human Epileptic Cortex / L. D. Iasemidis, D. W. Duke, W. S. Prichard // *Measuring chaos in the human brain: Proceedings of the Conference / World Scientific Publishing Co Pte Ltd*, 1991. — P. 49–82.
3. Iasemidis L. D. Chaos Theory and Epilepsy / L. D. Iasemidis, J. C. Sackellares // *The Neuroscientist*. — 1996. — Vol. 2. — P. 118–126.
4. Iasemidis L. D. Dynamical Resetting of the Human Brain at Epileptic Seizures: Application of Nonlinear Dynamics and Global Optimization Techniques / L. D. Iasemidis, D. S. Shiau, J. C. Sackellares, P. M. Pardalos, A. Prasad // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 2004. — Vol. 51. — P. 493–506.
5. Nair S. P. Dynamical Changes in the Rat Chronic Limbic Epilepsy Model / S. P. Nair, D. S. Shiau, W. M. Norman and others // *Epilepsia*. — 2004. — Vol. 45–57. — P. 211–212.
6. Ramaswamy R. Targeting Chaos through Adaptive Control / R. Ramaswamy, S. Sinha, N. Gupte. — *Physical Review E*. — 1998. — Vol. 57. — P. 2507–2510.
7. Wang X. F. Anticontrol of Chaos in Continuous-Time Systems via Time-Delay Feedback / X. F. Wang, G. Chen, X. Yu // *Chaos*. — 2000. — Vol. 10. — P. 771–779.
8. Morgul O. Model Based Anticontrol of Discrete-Time Systems, Proceedings of the 42nd / O. Morgul // *IEEE Conference on Decision and Control*, 2003. — P. 1895–1896.
9. Glass L. From Clocks to Chaos: The Rhythms of Life / L. Glass, M. C. Mackey. — Princeton: Princeton University Press, 1988. — 272 p.
10. Iasemidis L. D. Transition to Epileptic Seizures: An Optimization Approach into its Dynamics / L. D. Iasemidis, D. S. Shiau, P. M. Pardalos, J. C. Sackellares // *Discrete Problems with Medical Applications*. — 2000. — Vol. 55. — P. 55–74.
11. Yatsenko V. A. Geometric Models, Fiber Bundles, and Biomedical Applications / V. A. Yatsenko, P. M. Pardalos, J. C. Sackellares and others // *Proceedings of the 5th International Conference on Symmetry in Nonlinear Mathematical Physics*. — 2004. — Vol. 3. — P. 1518–1525.
12. Pardalos P. M. Seizure Warning Algorithm Based on Optimization and Nonlinear Dynamics / P. M. Pardalos, W. Chaovalitwongse, L. D. Iasemidis and others // *Mathematical Programming*. — 2004. — Vol. 101. — P. 365–385, 493–506.
13. Iasemidis L. D. Prediction of Human Epileptic Seizures Based on Optimization and Phase Changes of Brain Electrical Activity / L. D. Iasemidis, P. M. Pardalos, D. S. Shiau and others // *Optimization Methods and Software*. — 2003. — Vol. 8. — P. 81–104.
14. Kaneko K. Periodic-Doubling of Kink-Antikink Patterns, Quasiperiodicity in Antiferro-Like Structures and Aperiodic Intermittency in Coupled Logistic Lattice / K. Kaneko // *Progress of Theoretical Physics*. — 1984. — Vol. 72. — P. 480–486.
15. Ding M. Stability of Synchronous Chaos and On-Off Intermittency in Coupled Map Lattices / M. Ding, W. Yang // *Physical Review E*. — 1997. — Vol. 56. — P. 4009–4016.
16. Amritkar R. E. Stability of Periodic Orbits of Coupled-Map Lattices / R. E. Amritkar, P. M. Gade, A. D. Gangal, V. M. Nandkumaran // *Physical Review A*. — 1991. — Vol. 44. — P. R3407–R3410.

V. Yatsenko, O. Kochkodan

MODELING AND CONTROL OF LYAPUNOV EXPONENTS IN A COUPLED MAP LATTICE

We describe a control method based on optimization techniques to control of spatiotemporal chaos in a globally coupled map lattice (CML) system. We have developed a method for updating a CML model emulating complex spatial dynamics in an epileptic brain that exhibits characteristic spatiotemporal changes seen during transitions into a seizure susceptible state. Results from numerical simulations show that this algorithm is robust and effective in achieving controllability of the lattice model.

Keywords: modeling, optimization, Lyapunov exponent, control, chaos, oscillator.

Матеріал надійшов 17.01.2012