

# ТЕОРІЯ ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ

*Проведено аналіз показників, що характеризують водні, продовольчі та енергетичні ресурси України протягом 1993 – 2013 років. Створено математичну модель для дослідження механізмів виникнення хаотичних режимів, які призводять до нестабільності складних систем.*

© К.Л. Атоєв, 2017

УДК 519.711.3

К.Л. АТОЄВ

## **КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ГЛОБАЛЬНИХ ЗМІН НА ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК МІЖ ВОДНИМИ, ПРОДОВОЛЬЧИМИ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИМИ РЕСУРСАМИ**

**Вступ.** Глобальні зміни перетворюються у вагомий виклик для сучасного суспільства. Підвищення кількості та потужності екстремальних погодних явищ, зростання техногенних катастроф провокують основні загрози для стабільного розвитку: 1) водну кризу (водний дефіцит дестабілізує простір безпеки, тому ринок води у майбутньому може бути схожим з сучасним ринком енергоносіїв з гострою конкуренцією у «гарячих» точках глобального світу); 2) продовольчу кризу (кліматичні зміни сповільнюють зростання глобального врожаю, оскільки підвищення середніх температур скорочує сезон росту рослин та знижує врожай); 3) енергетичну кризу, яка пов'язана зі змінами балансу попиту та пропозиції енергоресурсів внаслідок досягнень у розвитку технологій добування сланцевих нафти і газу. Ці кризи посилюють одна одну. Тому потрібна інтегрована політика для мінімізування їх наслідків. Усе це потребує створення нових методів для комплексного моделювання, які дозволять проводити дослідження кумулятивного ефекту різних джерел ризиків. Тому у центрі уваги знаходяться дослідження взаємозв'язку продовольчих, енергетичних та водних ресурсів (ПЕВР). Посилення можливостей модельних досліджень у цій сфері – головна мета даної роботи.

**Моделювання взаємозв'язку ПЕВР.** Дослідження взаємозв'язку ПЕВР потребує використання інтегрованих моделей, які об'єднують різні контури регулювання еколого-економічної системи. Однак, більшість моделей економічного розвитку [1 – 3] розроблені ще до ери глобалізації і не дозволяють описати режими поведінки соціально-економічної системи в околиці точок біфуркації, коли системні закони, що керують поведінкою економічних систем, можуть різко змінюватися. Система у таких випадках стає дуже залежною від малих змін параметрів керування і початкових умов. Таким режимам, властивий стрибко-подібний характер, коли малі плавні зміни параметрів системи, приводять до різкої зміни траєкторії розвитку.

У ряді робіт запропоновано використовувати для дослідження подібних систем теорію режимів із загостренням, яка до цього успішно використовувалася для задач газової динаміки, фізики плазми, хімічної кінетики, лазерного термоядерного синтезу. Особливістю режимів із загостренням є те, що в них функція може необмежено зростати за обмежений час. Ці режими, можуть приводити до виникнення просторово локалізованих дисипативних структур. У таких структурах існує можливість появи детермінованого хаосу – дивних аттракторів [4]. Глобальна економіка може бути розглянута як відкрита, нелінійна, дисипативна, потенціальна система, така що самоорганізується, самовідтворюється та близька до стану нестійкої рівноваги [5]. Дійсно, в таких областях, як фондові і фінансові ринки, грошове звернення і кредит, економічні системи можуть залишатися нерівноважними досить тривалий час. Було зазначено, що коливальна динаміка ряду ключових показників світової економіки (індекс Доу-Джонса, ціна на золото, ціна на нафту і так далі) в певні періоди нагадує хаотичну динаміку коливань, характерних для дивних аттракторів [6].

Як свідчать дані The World Bank, показники приросту ПЕВР в Україні протягом 1993 – 2013 рр. (продовольчий індекс, споживання енергії, кількість води забраної з природних водних об'єктів) суттєво коливались. Траєкторії фазових кривих в окремі періоди можуть трактуватися як рух до граничного циклу, що свідчить про можливість існування стійких циклічних аттракторів. Тому є вагомими причини залучення математичних моделей детермінованого хаосу – для дослідження механізмів нестабільності взаємозв'язку ПЕВР.

Розглянемо завдання побудови моделі, яка дозволяла б отримати хаотичні режими в просторі соціально-економічних змінних. Базуючись на дослідженнях глобальної економіки будемо використовувати наступні припущення.

1. Глобальна економіка створює певний попит на діяльність різних виробничих систем, які відповідають за стійкий розвиток суспільства. Частина ресурсів, що виробляються цими системами, витрачається на підтримку їх внутрішньої структури, інша частина – на зовнішні функції, які визначаються попитом глобальної економіки. Ці попити залежать від різних чинників: поточного стану виробничих систем, навантаження, дії зовнішнього середовища, ефективності регуляторних механізмів.

2. Існують регуляторні механізми, які в разі надлишкового попиту призводять до зростання у виробничих системах кількості нових робочих місць (РМ). Кількість РМ не може зростати необмежено, оскільки існують певні економічні та матеріальні обмеження, які гальмують це зростання, тому відбувається постійне залучення їх частини до цього процесу.

3. Зростання структурних порушень (СП) пропорційне рівню навантаження на структуру, що забезпечують функцію виробничої системи (ФВС). Це навантаження залежить від величини цієї функції та кількості РМ.

4. Зневажливо малий рівень СП може привести до катастрофічних наслідків, якщо рівні функції  $i$ -ї виробничої системи, які є залежними від глобальних змін – досить високі.

5. Існують регуляторні (адаптаційні) механізми, які в певних межах здатні усувати виникаючі СП, активуючись при їх виникненні і накопиченні.

У роботі [7] показано, що в межах цих припущень, взаємозв'язок ФВС, РМ та СП описуються моделлю детермінованого хаосу Лоренца [8], у якій виникають підтримувані хаотичні режими (рис. 1).

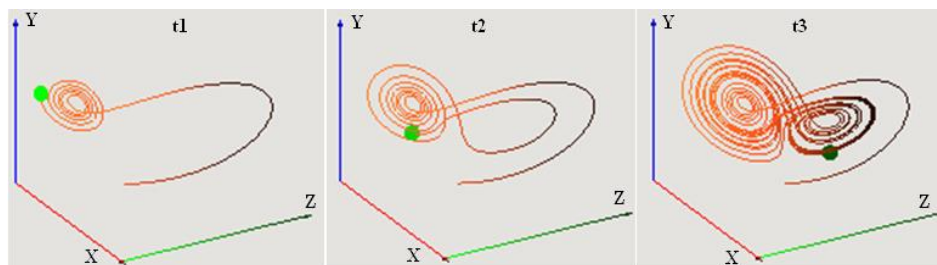


РИС. 1. Динаміка зміни фазового портрета системи Лоренца

Оцінка ризику прийнятих рішень базується на інформації про ймовірність можливих результатів і про можливі ущери. Це вимагає високого рівня знань про об'єкти, що досліджуються. Відсутність таких знань внаслідок неповноти вибірки, або стохастичної природи об'єкта дослідження, приводить до ситуації підвищеної невизначеності. У цьому випадку ефективність детермінованих моделей значно знижується. Тому особливої актуальності набуває завдання побудови стохастичних моделей взаємозв'язку ПЕВР.

Розглянемо виробничі системи, які мають відношення до секторів економіки, що пов'язані з ПЕВР. Мінливість врожайності сільськогосподарських культур, коливання цін на енергоносії, зміни балансу водних ресурсів, викликані погодними умовами, введенням нових технологій, які значно змінюють продуктивність робочих місць, дають вагомі підстави вважати параметри цієї моделі залежними від часу. Крім того, будемо вважати, що існують випадкові збурення, які стають додатковими факторами збільшення рівня структурних порушень. Тоді модель [8] трансформується до наступного вигляду:

$$x_i = \sigma_i(t)(y_i - x_i), \quad y_i = r_i(t)x_i - y_i - x_i z_i, \quad z_i = x_i y_i - b_i(t)z_i + \varepsilon w, \quad (1)$$

де  $x$  – рівень ФВС,  $y$  – кількість РМ,  $z$  – рівень СП,  $i = f, w, e$  відповідно для продовольчого, водного та енергетичного секторів економіки,  $\sigma, r, b$  – параметри моделі,  $w(t)$  –  $n$ -мірний стандартний винеровський процес,  $\varepsilon$  – параметр інтенсивності збурень.

Скорочення ресурсної бази внаслідок кліматичних змін зменшує можливості стабільного розвитку. Щодо України, існуючі ресурси, дозволяють лише незначно змінювати параметри керування економікою, тому виникає завдання пошуку таких траєкторій розвитку, які б дозволяли за рахунок малих змін параметрів, здійснювати «перескок» з однієї траєкторії розвитку на іншу. Моделі дивних аттракторів можуть бути використані для дослідження умов, за яких можливий фазовий перехід з одного граничного циклу до іншого.

Зростання попиту веде до зростання параметра  $r$ . Зростання пропозиції – до зменшення цього параметра. Існують інтервали відношення попиту/пропозиція, які відповідають різним режимам метастабільного хаосу. Малі флуктуації параметра  $r$  можуть викликати суттєву трансформацію динаміки системи. У верхній границі цього інтервалу такі флуктуації можуть викликати катастрофічні наслідки, пов'язані з переходом від стабільності до нестабільності, від стану з низьким рівнем вразливості до стану з її високим рівнем.

Дослідження детермінованого хаосу у фізиці, біології, економіці привело до істотного переосмислення його ролі в самоорганізації складних динамічних систем [9]. Виявилось, що завдяки хаотичним режимам з їх підвищеною чутливістю до малих обурень параметрів, стає можливим переведення системи з околиці одного нестійкого граничного циклу в околицю іншого. Іншими словами стає можливим якісна зміна поведінки соціально-економічної системи, за рахунок малих змін параметрів керування, а значить при значній економії ресурсів. Виходячи з цього розуміння, трансформувалося і завдання керування хаосом. Від вибору дій, що сприяють припиненню хаосу, до вибору керувань, що дозволяють стабілізацію певних нестійких періодичних траєкторій [9].

Система (1) може бути записана в комплексній формі відносно двох комплексних змінних  $x$  та  $y$  однієї речової змінної  $z$ , що має речові параметри  $\sigma$  та  $b$  і комплексні параметри  $r = r_1 + ir_2, a = 1 - ei$ . Як показано в [9] у комплексній системі рівнянь Лоренца реалізується сценарій переходу до хаосу через субгармонійний каскад біфуркацій двомірних торів. У системі народжується граничний цикл частоти  $\omega = r_2\sigma/(\sigma + 1)$ .

Повернемося тепер до системи рівнянь (1). У цьому випадку маємо  $n$  осциляторів, що генерують коливання з частотами  $\omega_i$  відповідно. Якщо задати набір функцій зв'язку між осциляторами, то отримаємо систему зв'язаних осциляторів. Колективна синхронізація даних осциляторів може бути досліджена за допомогою моделі Курамото [10], яка має наступний вигляд:

$$\partial\theta_i / \partial dt = \omega_i + K / N \sum_{j=1}^N \sin(\theta_k - \theta_j), \quad i = 1 \dots N,$$

де  $\theta_i \in [0, 2\pi]$  – фазові змінні,  $\omega_i$  – власні частоти,  $K > 0$  – параметр зв'язку.

Таким чином, завдання керування соціально-економічним розвитком в умовах виникнення хаотичних режимів зводиться до керування частотою ненульового середнього поля, що продукується зв'язаними осциляторами.

За допомогою даних Світового банку проведений аналіз динаміки змін показників, що характеризують споживання свіжої води та енергії протягом 1993 – 2013 років. Як видно з рис. 2 за період 1995 – 1998 років траєкторія фазової кривої змін вказаних показників залишалася в зоні тяжіння граничного циклу 1. Трансформації в економіці України в 1999 та 2000 роках призвели до переходу траєкторії цієї фазової кривої у зону тяжіння іншого аттрактора – граничного циклу 2 (період 2000 – 2004 років). Траєкторія фазової кривої за період 2005 – 2013 років може трактуватися як рух до нового граничного циклу 3.

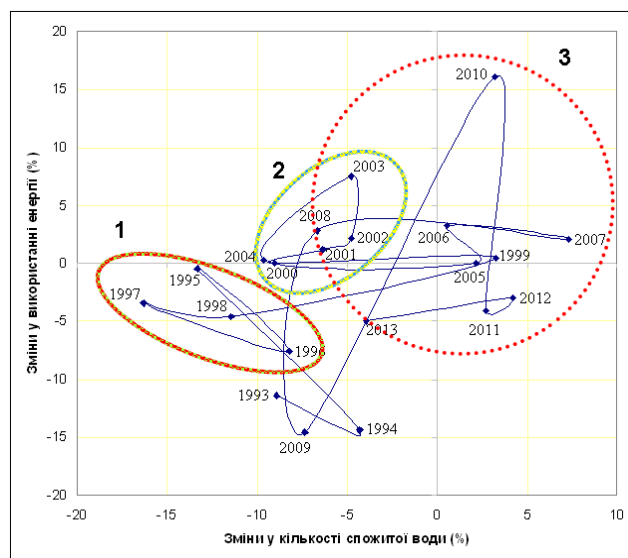


РИС. 2. Фазова траєкторія змін споживання свіжої води та енергії в Україні у 1993 – 2013 роках за даними The World Bank (<http://wdi.worldbank.org/table/>)

**Висновки.** Проведено аналіз показників що характеризують взаємозв'язок ПЕВР в Україні протягом 1993 – 2013 рр. Створено математичну модель для дослідження взаємозв'язку ПЕВР, яка дозволяє досліджувати можливі механізми виникнення хаотичних режимів, що викликають нестабільність складних систем. Модель може бути використана для дослідження умов, за якими «перескок» з однієї траєкторії розвитку на іншу, здійснюється за рахунок малих змін параметрів, що особливо важливо в умовах обмежених ресурсів.

Робота проводиться в рамках проекту «Комплексне моделювання управління безпечним використанням продовольчих, водних і енергетичних ресурсів з метою сталого соціального, економічного і екологічного розвитку», що виконується спільно НАН України та Міжнародним Інститутом Прикладного Системного аналізу (IIASA).

КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ  
НА ВЗАИМОСВЯЗЬ ВОДНЫХ, ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
РЕСУРСОВ

Проведен анализ показателей, характеризующих взаимосвязь продовольственных, энергетических и водных ресурсов в Украине на протяжении 1993 – 2013 гг. Создана математическая модель для исследования возможных механизмов возникновения хаотических режимов, которые вызывают нестабильность сложных систем.

К.Л. Атоєв

INTEGRATED MODELING OF CLIMATE CHANGES IMPACT ON NEXUS OF WATER,  
FOOD AND ENERGETIC RESOURCES

The analysis of indicators that characterize the nexus of food, energy and water resources in Ukraine during 1993 – 2013 years is carry out. The mathematical model is developed for investigation of possible mechanisms of chaotic regimes arising, that lead to instability of complex systems.

1. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 167 с.
2. *Геловани В.А., Егоров В.А., Митрофанов В.Б., Пионтковский А.А.* Исследование влияния управления на глобальную модель Форрестера. *Проблемы кибернетики.* 1976. Вып. 31. С. 187 – 224.
3. *Сергиенко И.В., Яненко В.М., Атоєв К.Л.* Общая концепция управления риском экологических, техногенных и социогенных катастроф. *Кибернетика и системный анализ.* 1997. № 2. С. 65 – 86.
4. *Режимы с обострением. Эволюция идеи. Законы коэволюции сложных структур / под ред. Г.Г. Малинецкого.* М.: Наука. 1998. 256 с.
5. *Николис Г., Пригожин И.* Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир, 1979. 327 с.
6. *Акаев А.А., Коротаев А.В., Фомин А.А.* О причинах и возможных последствиях второй волны глобального кризиса. Моделирование и прогнозирование глобальной, региональной и национальной динамики / Отв. ред. А.А. Акаев, А.В. Коротаев, Г.Г. Малинецкий, С.Ю. Малков. М.: ЛИБРОКОМ/URSS, 2012. С. 424 – 459.
7. *Атоєв К.Л.* Возникновение режимов детерминированного хаоса в задачах управления социально-экономическим развитием. *Математичне моделювання в економіці.* 2013. № 3. С. 90 – 97.
8. *Lorenz E.* Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.* 1963. Vol. 20. P. 130 – 141.
9. *Магницкий Н.А., Сидоров С.В.* Новые методы хаотической динамики. Едиториал УРСС, 2004. 320 с.
10. *Acebrón J.A., Bonilla L.L., Vicente P. et al.* The Kuramoto model: a simple paradigm for synchronization phenomena. *Reviews of Modern Physics.* 2005. **77**. P. 37 – 185.

Одержано 17.02.2017