

ТОЧКИ БІФУРКАЦІЇ В РОЗВИТКУ ЕКОНОМІЧНОЇ СИСТЕМИ

The algorithm of determination of the bifurcation point in case of soft bifurcation of the type "fork" with the growth of noise level is suggested in the article.

Економічні проблеми, з якими зіткнулася Україна протягом більш ніж десятилітнього періоду господарських перетворень, переконливо підтверджують, що універсальний підхід, заснований виключно на рецептах неокласичної школи економічної теорії, не є вичерпним для побудови ефективної соціально-орієнтованої ринкової економіки. Ігнорування національної специфіки економічної системи призвело до глибокої невідповідності результатів перетворень їх початковому задуму і декларованим цілям.

Актуальність теми дослідження визначається сучасною методологічною і теоретичною ситуацією в економічній науці, яка розвивається переважно в рамках лінійної парадигми, звично репрезентуючи еволюцію як одноваріантний та безальтернативний розвиток. Сьогодні подібні уявлення про економічну динаміку нерелевантні. Автор вважає, що об'єктом економічних досліджень повинні бути не тільки лінійні та рівноважні процеси, але і синергетичні, нелінійні метаморфози, які погано кореспондуються з ортодоксальними науковими підходами. Це особливо актуально у наш час, коли економіка втрачає звичні властивості стабільності, динамічної рівноваги, а темпи змін безперервно зростають, все більш явно демонструючи нелінійні тенденції та ефекти. Ми вступили в період фатальної ескалації локальних ризиків і, як наслідок, глобальної біфуркації. Більш того, реальні та потенційні загрози, цілком звичайні в локальній ситуації, спонтанно переростають у глобальну економічну кризу.

Прямолінійна екстраполяція тих чи інших тенденцій, на яких здебільшого будувалися прогнози соціально-економічної перебудови, поступають місцем моделям, в яких майбутнє бачиться як простір можливостей, а теперішній час – як напружений процес вибору.

Дійсно, в сучасній економіці переважають складні синергетичні системи з безліччю змінних, великою кількістю прямих та зворотних зв'язків, і в цих системах безперервно відбуваються як лінійні, так і нелінійні процеси. Дослідження відкритих економічних систем ускладнюються їх емерджентними властивостями, які серйозно ослаблюють можливості аналітичного підходу, що фокусує увагу на процедурі розподілу системи на елементарні частини, щоб шляхом їх пізнання пояснити її поведінку в цілому.

Зміни в економіці носять універсальний характер, і дослідженню проблематики еволюційних та біфуркаційних процесів присвячена значна кількість наукової літератури. Брюссельська школа І. Пригожина розробляє теорію дисипативних структур, школа Г. Хакена досліджує процеси самоорганізації в різних системах, теорія катастроф, яка вивчає стрибкоподібні зміни, розвивається в роботах В. І. Арнольда, Т. Постона, І. Стюарта, Дж. Томпсона [1 – 4]. Категорії та поняття теорії самоорганізації систем стають предметом все більш широкого філософського і наукового осмислення. У той же час, огляд літератури ясно показує, що сучасні уявлення про синергетику не отримали дотепер системної інтерпретації, адекватної для створення змістовних моделей еволюційних і біфуркаційних процесів в економіці. Найбільш нерозглянутою залишається завдання визначення ключових моментів у розвитку економічної системи будь-якого рівня.

Метою статті є обґрунтування необхідності визначення точок біфуркації в розвитку відкритої економічної систем та спроба вирішення цього завдання на математичному рівні в просторі часових параметрів.

Синергетика розуміє під загальносистемною закономірністю не єдиний шлях розвитку, а єдині принципи "ходіння різними маршрутами". Синергетичний підхід ставить основним завданням не тільки реальність, але й можливість, ситуації вибору, точки біфуркації (розгалуження) процесу розвитку системи.

З точки зору синергетики, розвиток відкритої економічної системи як нелінійної описується за допомогою двох моделей: еволюційної та біфуркаційної. Особливістю еволюційного етапу розвитку є незмінність якостей системи. Це період з добре передбаченими лінійними змінами. Але саме тут відбувається наростання внутрішньої нерівноваги, що відчувається як наростання кризових явищ. Руїнування, дестабілізація кожної конкретної системи має свій сценарій. У побудові системи є свої слабкі місця, де обурюючий удар дає найбільші наслідки. Тому особливості дестабілізації залежать, в першу чергу, не від специфіки зовнішньої дії, а від структури самої системи.

Закони розвитку економічних систем співпадають із законами функціонування фізичних, біологічних та інших систем. Так, з позицій нерівноважної термодинаміки розвиток трактується як послідовність переходів ієрархії структур зростаючої складності. Перехід на новий рівень розвитку йде від безладдя до порядку через нестійкість. У нерівноважних ситуаціях поява порядку можлива тільки за наявності зовнішніх потоків (речовинно-енергетичних або інформаційних), що утримують систему далеко від рівноваги. Взаємодія з середовищем створює потенційні можливості для виникнення нестійких станів і появи вслід за нестійкістю нової, більш впорядкованої структури.

Таким чином, нестійкість, що виникає в процесі розвитку, створює можливості для стрибкоподібного переходу системи в новий стан. Стрибок можна розглядати як реакцію системи на обурення з метою його компенсації, тільки система повертається не в старий стан, а переходить в новий, тобто "розвиток через нестійкість" забезпечує стійкість на більш високому рівні. При цьому сама стійкість розуміється не як стійкість рівноважних структур, а як динамічна стійкість відкритих систем за рахунок самоорганізації та авторегуляції.

Одним з принципів розвитку є принцип зростання ентропії, що відображає утворення нових матеріальних форм і структурних рівнів. Рівняння Больцмана для ентропії часто розглядають як математичний вираз закону еволюції. Проте ця математична модель процесу розвитку володіє серйозними недоліками. Вона показує лише напрям еволюції, але не враховує того факту, що економічні системи, які розвиваються, – це системи відкриті та можуть зменшувати свою ентропію за рахунок збільшення ентропії в зовнішньому середовищі. Залежно від значень параметра, що управляє, система може мати велику кількість стійких та нестійких станів. Траєкторія розвитку відкритої економічної системи характеризується чергуванням стійких областей, де домінують детерміністичні закони, і нестійких областей поблизу точок біфуркації, де перед системою відкриваються можливості вибору одного з декількох варіантів майбутнього.

По мірі наростання внутрішньої нерівноваги система наближається до біфуркаційної точки. У цій точці еволюційний шлях системи розгалужується. Система стає дуже чутливою до зовнішніх і внутрішніх дій. Вибір того чи іншого шляху в точці біфуркації залежить від чинника випадковості, який реалізується через діяльність конкретних осіб. Саме менеджер виводить систему на нову системну якість. Роль випадковості не просто велика, вона фундаментальна. Вона робить процес незворотним. Розвиток таких систем має принципово непередбачуваний характер.

Спокійний еволюційний етап розвитку характеризується наявністю відповідних механізмів, які стабілізують стан економічної системи та ліквідують будь-яке відхилення від нього (повертають систему до цього стану). З часом ці механізми втрачають свої якості через кількісне зростання відповідних параметрів внутрішнього та зовнішнього середовища, завдяки чому вони вже не можуть здійснювати стабілізацію системи. Наступає кризовий стан. Нове вступає в суперечність із ста-

рим і, як вирішення цієї суперечності, відбувається стрибко-подібний перехід системи в новий стійкий стан.

Останнім часом нелінійні моделі широко використовуються при дослідженні поведінки складних систем у різних проблемних областях, у тому числі економіці. Біфуркація нелінійної економічної системи має важливе практичне значення. Зокрема, відомий факт – якщо система знаходиться в стані стійкої рівноваги, то для переходу системи в інший стан рівноваги необхідні значні зусилля. На практиці це означає таке – якщо керований об'єкт (наприклад, підприємство) знаходиться в стабільному стані, і цей стан нас не влаштовує, то змінити ситуацію часто просто неможливо.

Завдання дослідження точок біфуркації як економічна проблема полягає в їх визначенні та аналізі поведінки показників господарської діяльності поблизу структурно нестійких критичних точок. Поняття біфуркації дозволяє глибше проникнути в сутність структурної нестійкості, виявити її наслідки.

Біфуркація (від лат. *bifurcus* – роздвоєний) є процесом якісного переходу від стану рівноваги до хаосу через послідовну дуже малу зміну періодичних точок. Обов'язково необхідно відзначити, що відбувається якісна зміна властивостей системи – катастрофічний стрибок. Момент стрибка відбувається в точці біфуркації.

Точки біфуркації іноді називають "динамічними ключами" управління. Проте мистецтво управління цими ключами поки, на жаль, пізнається лише на гіркому досвіді. Досвід останнього десятиріччя показав, що в умовах нестабільності навіть невеликі флуктуації можуть запустити процес з непередбачуваними наслідками для всієї системи.

Біфуркації виникають під час переходу економічної системи від стану видимої стабільності та рівноваги до кризи. Фактично перший перехід від стабільності до стану видимої впорядкованості, для якого характерні мінливості та нестабільності, відбувається в першій точці біфуркації. Далі кількість біфуркацій збільшується, досягаючи величезних розмірів. З кожною біфуркацією функція нестабільності системи наближається до хаосу. Однак, за допомогою теорії біфуркації можна передбачити характер руху, що виникає під час переходу системи в якісно інший стан.

Розглянемо можливість використання теорії біфуркації при формуванні стратегії розвитку промислового підприємства. Підприємство як відкрита економічна система балансує на внутрішніх суперечностях, суперечностях зовнішнього середовища і на суперечностях, що виникають при взаємодії цих середовищ. Ці суперечності випробовують на розрив внутрішні та зовнішні зв'язки системи. Економічна система з реотропним (можливість пристосовуватися до змін зовнішнього середовища) потенціалом здатна зберігати або відновлювати необхідні для неї зв'язки. Анергічна (відсутність опору зовнішньому середовищу) поведінка системи вказує на відсутність потенціалу.

Визначеності або невизначеності в поведінці економічної системи можна виявити через зміну показника, який може бути неістотним ($M[\varepsilon_i] \approx 0$) або істотним ($M[\varepsilon_i] \neq 0$). Таке визначення для збурюючих явищ є можливим при оцінці поведінки показника в часі. Якщо сума відхилень (позитивних та негативних) ключового для конкретної економічної системи

показника відповідає умові $M[\varepsilon_i] \approx 0$, можна з великою впевненістю стверджувати, що система стабільна в істотних про-
роях даного показника. Це твердження правильне, якщо врахувати кількісний аспект. Для якісної оцінки збурень необхідно розглядати сутність конкретних коливань шляхом обліку таких відхилень від порогового значення (або порівняння з нормативним показником, значення якого є критичним).

Найбільший інтерес для аналізу та оцінки поведінки економічної системи в умовах нестабільності зовнішнього середовища через її окремі характеристики є неадекватна поведінка ключового для підприємства показника (як ключовий показник можуть розглядатися – дохід, витрати, прибуток, рівень завантаження виробничих потужностей, обсяг товарної продукції, продуктивність праці тощо). Як вже відзначалося, істотність збурень або, іншими словами, неадекватність поведінки показника може бути представлена залежністю $M[\varepsilon_i] \neq 0$, де – ε_i

випадкова величина. Випадкова компонента не може бути виявлена традиційними методами дослідження економічних систем, оскільки випадковість – це нескінченна безліч умов, за яких подія не може бути прогнозована.

Як протиповага випадковості виступає необхідність – це прояв події, яка обов'язково наступить за певних обставин. Слід підкреслити, що характер ймовірності події є її об'єктивною властивістю, а не результатом спостереження над нею. Причиною різних форм прояву є подразник, тобто обставини.

У загальному випадку підприємство як економічну систему можна описати деякою функцією, де X – інтегральний показник, що характеризує положення системи у фазовому просторі, а x_1, x_2, \dots, x_n – параметри системи. Деяку підмножину загальної безлічі параметрів складають біфуркаційні параметри, які характеризуються тим, що за деяких значення цих параметрів система в своєму розвитку переходить на нову траєкторію, причому можливих нових траєкторій декілька, і вибір визначається випадковою зміною умов у точці біфуркації.

Еволюцію складної системи можна описати як метастабільний стан, який характеризується чергуванням точок біфуркації, перехідних процесів і періодів стійкого розвитку.

Траєкторію, яка призводить до банкрутства підприємства, можна розглядати як небезпечну траєкторію, що характеризується руйнуванням системи, перехід на яку відбувається при "невдалому проходженні" точки біфуркації. Таким чином, важливо вміти діагностувати дану точку і процеси, які їй передують, з метою ухвалення своєчасних управлінських рішень для забезпечення "вдалого проходження" точки біфуркації та виходу на нову, більш сприятливу траєкторію розвитку. Важливо у момент ухвалення рішення в точці біфуркації мати нагоду прогнозувати можливу поведінку системи, знати горизонт цього прогнозу і правильно оцінювати поточний стан підприємства.

Крім того, може стояти і зворотнє завдання – завдання знаходження точки біфуркації в просторі параметрів і визначення типу біфуркації (передбачається, що параметри системи, що досліджується, міняються поволі порівняно із зовнішніми змінами) за часовим рядом, який спостерігається, – дискретним відліком змінного стану.

При розгляді поведінки складної системи часто береться до уваги такий фактор, що на неї діє випадковий шум – мала нерегулярна зовнішня дія невизначеної природи (слабкі флуктуації). Поблизу точки біфуркації стійкість системи знижується, наслідком чого є посилення флуктуації. Таким чином, зростання шуму є ознакою наближення до точки біфуркації (також говорять про шумових передвісників біфуркації).

Нелінійні системи володіють такою важливою властивістю: біфуркаційні задачі для систем високої розмірності часто зводяться до розгляду систем розмірності один або два. Таким чином, висновки, що зроблено для деякої простої системи, виявляються досить загальними.

Розглянемо одну з найпростіших біфуркацій – надкритичну (м'яку) біфуркацію типу "вилка". Це локальна біфуркація положення рівноваги, корозмірності 1 (чим нижче корозмірність біфуркації, тим більш вона типова для різноманітних динамічних систем).

Найпростіша система, в якій спостерігається дана біфуркація, може бути описана нелінійним автономним звичайним диференціальним рівнянням з параметром:

$$\dot{x} = v(x, \lambda) = x(\lambda - x^2), \quad (1)$$

де $x = x(t)$ – змінна стану;

t – час;

λ – параметр,

v – фазова швидкість. Біфуркаційне значення параметра $\lambda = 0$.

Опис системи може бути подано в термінах потенціалу U :

$$v(x, \lambda) = -\frac{\partial U(x, \lambda)}{\partial x}, \quad U(x, \lambda) = \frac{x^4}{4} - \frac{\lambda x^2}{2}. \quad (2)$$

Система знаходиться під впливом слабого шуму (в даному випадку розглядається так званий броунівський шум: змінна стану періодично складається з деякою випадковою величиною). Таким чином, $x(t)$ є випадковим процесом. Часовий ряд $x = x(t_j)$, який ми маємо в результаті, і є часовим рядом, що досліджується.

Розглянемо задачу знаходження залежності сталого розподілу часового ряду, що спостерігається, від різниці поточно-го та біфуркаційного значень параметру. Дослідимо випадок, коли $\lambda(0)$.

Використаємо такі очевидні наближення функції $v(x, \lambda)$:

$$v(x, \lambda) \approx \lambda x, |\lambda| \gg \bar{x}^2, \quad (3)$$

$$v(x, \lambda) \approx -x^3, |\lambda| \gg \bar{x}^2, \quad (4)$$

де \bar{x} позначає характерну величину x (як оцінка характерної величини береться середньоквадратичне відхилення σ_x , оскільки потенціал (2) симетричний щодо початку координат, і можна припустити рівність нулю математичного очікування x). Наближення (3) і (4) дозволяють розділити аналіз поведінки системи (1) за трьома діапазонами значень параметру λ : в одному з них залежність поведінки системи від параметра є найпростішою, в іншому – відсутня взагалі, а в третьому ($\lambda \approx \bar{x}^3$) спрощений аналіз не застосовується.

При пошуку функції щільності розподілу часового ряду замість окремо взятої системи розглядається комплекс систем. Якщо одній системі відповідає показник в одновимірному фазовому просторі, то образом комплексу систем є сукупність показників. Передбачається, що слабкі шуми, які діють на систему в комплексі, не згаджені (тобто, у кожній системі – свій незалежний генератор шуму). Рух кожного показника шуму включає дві складові: детерміновану (рух, який обумовлено градієнтом потенціалу) і стохастичну (рух, який обумовлено дією шуму). Оскільки (2) у випадку $\lambda(0)$ є потенційною ямою з нескінченно високими стінами, можна вважати, що з часом встановиться деякий стаціонарний розподіл лінійної щільності показників шуму. Передбачається ергодичність системи – збіг розподілу вірогідності для положення окремої точки біфуркації з розподілом щільності показників шуму.

Таким чином, задача знаходження функції щільності розподілу часового ряду, що досліджується, зводиться до задачі про дифузію в потенційній ямі. У цьому випадку слабкий шум можна охарактеризувати коефіцієнтом дифузії:

$$K \equiv \int_0^{+\infty} K(\xi) \xi^2 d\xi, \quad (5)$$

де $K(x, s, t)$ – вірогідність перенесення об'єкта з точки x на відрізок $[s, s+ds]$ за час dt . Розглядається окремий, але поширений випадок, коли $K(x, s, t) = K(\xi), \xi = |s - x|$.

Знаходження стаціонарного розподілу показників шуму розглядається як функція для потоку показників, що визначаються градієнтом щільності, та дорівнюється до потоку, який визначається градієнтом потенціалу. Рішення отриманого диференціального рівняння з урахуванням припущення про ергодичність системи дає можливість знайти функцію щільності розподілу часового ряду, що досліджується:

$$f(x) = \exp\left(-\frac{1}{k}U(x)\right) / \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{1}{k}U(x)\right) dx. \quad (6)$$

Звідси, в області дії наближення (3) дисперсія, по мірі наближення до точки біфуркації, зростає відповідно до закону:

$$\sigma_x^2 = \frac{k}{|\lambda|}, |\lambda| \gg \sqrt{k}. \quad (7)$$

Припущення про тип біфуркації також можна перевірити тільки на відрізку насичення, оскільки при значному віддаленні від точки біфуркації система не відрізняється від лінійної. Якщо дійсно має місце біфуркація вказаного типу, то сталий розподіл повинен відповідати функції (6) з підставле-

ними оцінками k та λ . Висновок про відповідність можна робити також на підставі найпростішого порівняння третіх та четвертих центральних моментів (асиметрії та ексцесу).

Розглянемо можливість використання запропонованої моделі для визначення точки біфуркації у розвитку промислового підприємства. Як об'єкт дослідження використаємо результати господарської діяльності ВАТ "Ясинуватський машинобудівний завод". Ключовим для даного дослідження показником будемо вважати обсяг чистої виручки від реалізації продукції (таблиця).

Таблиця

Чиста виручка від реалізації продукції ВАТ "Ясинуватський машинобудівний завод", тис. грн

	2001 рік	2002 рік	2003 рік	2004 рік	2005 рік	2006 рік	2007 рік
1 квартал	13 218,41	10 434,50	15 467,94	28 646,26	28 110,59	29 103,67	27 407,31
2 квартал	16 680,37	13 043,13	16 140,46	32 465,76	37 783,05	39 226,69	35 237,97
3 квартал	15 736,20	14 086,58	18 158,01	35 012,09	42 014,75	27 838,29	36 543,08
4 квартал	17 309,82	14 608,30	17 485,49	31 192,59	43 223,81	30 369,05	31 322,64

Здійснивши задачу знаходження функції щільності розподілу часового ряду, що досліджується, можна визначити, що підприємство знаходилося у точці біфуркації у перших кварталах 2002 та 2004 років, а також у другому кварталі 2006 року. Саме в ці періоди має місце різке зростання щільності показників шуму. На жаль, остання точка біфуркації не була відповідним чином використана керівництвом підприємства, і у подальшому мало місце погіршення показників господарської діяльності. Що стосується діяльності підприємства у 2008 році, то економічна криза спровокувала наближення точки біфуркації та викликала необхідність вибору напрямку аттрактору, який і визначить можливості розвитку ВАТ "Ясинуватський машинобудівний завод" на найближчі декілька років.

Таким чином, запропоновано алгоритм визначення точки біфуркації у випадку м'якої надкритичної біфуркації типу "вилка" за наростанням рівня шуму. Була показана працездатність алгоритму на прикладі найпростішої динамічної системи. Даний алгоритм також може бути використаний при розробленні засобів попередження кризи в економічних системах та в процесі управлінні ризиком.

Література: 1. Пригожин И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой: Пер. с англ. / И. Пригожин, И. Стенгерс; [Общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачкова. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с. 2. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 406 с. 3. Постон Т. Теория катастроф и ее приложения / Т. Постон, И. Стюарт. – М.: Мир, 1980. – 608 с. 4. Томпсон А. А. Стратегический менеджмент: Искусство разработки и реализации стратегии: Учебник / А. А. Томпсон, А. Дж. Стрикленд; [Пер. с англ. — М.: Банки и биржи; ЮНИТИ, 1998. – 576 с. 5. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Кн. 1. – М.: Мир, 1984. – 350 с. 6. Арнольд В. И. Теория катастроф. – М.: Наука, 1990. – 128 с. 7. Томпсон Дж. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике. – М.: Мир, 1985. – 254 с. 8. Йосс Ж. Элементарная теория устойчивости и бифуркаций / Ж. Йосс, Д. Джозеф. – М.: Мир, 1983. – 301 с. 9. Капица С. П. Синергетика и прогнозы будущего / С. П. Капица, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинецкий. – М.: Наука, 1997. – 288 с. 10. Князева Е. Н. Синергетика как новое мировоззрение: диалог с И. Пригожиным / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов // Вопросы философии. – 1992. – №12. – С. 4. 11. Курдюмов С. П. Козволюция сложных социальных структур: баланс доли самоорганизации и доли управления / С. П. Курдюмов, Е. Н. Князева // Материалы Первой международной научно-практической конференции "Стратегии динамического развития России: единство самоорганизации и управления". Том 1. – М.: Проспект, 2004. – 146 с.