

ТЕМА 13. СИНЕРГЕТИКА ЯК СУЧАСНИЙ ЕТАП РОЗВИТКУ КІБЕРНЕТИЧНИХ ІДЕЙ

План

1. Концептуальні засади синергетики та нелінійної динаміки
2. Основні поняття теорії складних систем
3. Самоорганізація та етапи еволюції складних систем

Література

1. Багриновский К. А. Модели и методы экономической кибернетики. — М.: Экономика, 1973. — 206 с.
2. Бир Ст. Кибернетика и управление производством. — М.: Физматгиз, 1963. — 275 с.
3. Браславец М. Е., Гуревич Т. Ф. Кибернетика. — К.: Вища шк., 1977. — 325 с.
4. Винер Н. Кибернетики или управление и связь в животном и машине. — М.: Сов. радио, 1958. — 216 с.
5. Глушков В. М. Введение в кибернетику. — К.: Изд-во АН УССР, 1964. — 324 с.
6. Кобринский Н. Е. Основы экономической кибернетики. — М.: Экономика, 1969. — 255 с.

1. Концептуальні засади синергетики та нелінійної динаміки

Сучасним етапом розвитку ідей кібернетики, загальної теорії систем та системного аналізу можна вважати науковий напрямок, відомий як *синергетика* (грец. «synergeia», «synergetikos» — такий, що діє спільно, спільний, сприяння, співробітництво). Цю назву запропонував професор Штутгартського університету Герман Хакен, якого вважають засновником синергетики. Зазначений термін акцентує увагу на *узгодженості, взаємодії частин системи у процесі утворення її структури як єдиного цілого*.

Поряд із терміном *синергетика* часто використовують терміни *теорія складності* (complexity theory), *теорія динамічних (складних) систем* (dynamic (complex) system theory), *теорія хаосу* (chaos theory), *нелінійна динаміка* (nonlinear dynamic) або більш загальний — *нелінійна наука* (nonlinear science), у виразнюючи при цьому *принципову нелінійність, нерівноважність, складність* досліджуваних явищ. Фундаментальні результати в цій галузі здобули Г. Хакен, І. Пригожин, Б. Мандельброт, М. Мойсєєв, С. Курдюмов, Г. Малинецький, О. Самарський, О. Тихонов, Р. Том та інші. Надалі послуговуватимемося термінами «синергетика», «нелінійна динаміка», «теорія складних систем».

Синергетика вивчає складні системи, які містять багато підсистем різної природи, маючи на меті виявити, в якій спосіб взаємодія таких підсистем приводить до виникнення нових стійких просторових, часових чи просторово-часових структур або режимів функціонування, а також досліджує характерні масштаби й швидкості перехідних процесів.

Синергетика акцентує увагу на явищах, що виникають завдяки спільній дії кількох (багатьох) факторів, кожний з яких окремо до цього явища не приводить. *Синергетику часто визначають як науку про самоорганізацію*.

Під самоорганізацією розуміють мимовільне, спонтанне самоускладнення форми (у загальнішому випадку — структури системи та законів її функціонування) унаслідок повільної та плавної зміни її параметрів. Іншими словами, самоорганізація — це утворення впорядкованих структур із хаосу. Отже, синергетика являє собою нову узагальнювальну науку, що вивчає основні закони самоорганізації складних систем.

Винятково важливим етапом у розвитку нового, нелінійного способу мислення було виникнення та уточнення поняття *патерну* (наближено можна перекласти як шаблон, зразок). Засновник тектології (в якій було закладено основні кібернетичні принципи та ідеї ще на початку ХХ ст.) О. Богданов першим спробував об'єднати поняття організації, патерну та складності в послідовну теорію систем. Кібернетика зосередилась на патернах зв'язку та управління — зокрема на патернах кругової причинності, на яких ґрунтується концепція зворотного зв'язку; завдяки цьому в кібернетиці вперше було чітко розмежовано патерн організації системи та її фізичну структуру.

За останні двадцять років було знайдено та проаналізовано недостатні «елементи» — концепцію самоорганізації (синергетика) та нову математику складних систем. Нова математика складних систем є, по суті, математикою візуальних патернів — дивних

атракторів, фазових портретів, фракталів тощо, які аналізуються в контексті топологічної структури, вперше розробленої А. Пуанкаре.

Синергетика та кібернетика як міждисциплінарні наукові напрямки мають багато спільного. Системи, що є предметом їх вивчення, можуть бути різної природи (хімічні, фізичні, біологічні, економічні, соціальні тощо). Зрозуміло, що ці системи змістовно вивчаються багатьма іншими спеціальними науками. Кожна з них досліджує певну множину об'єктів своїми, тільки їй притаманними методами, формуючи результати «власною» мовою опису. Але через наявну диференціацію науки досягнення однієї з її галузей часто стають важкозрозумілими або й недоступними для фахівців з інших наукових напрямків.

Тим часом синергетика та кібернетика абстрагуються від специфічної природи систем, намагаючись описувати їх функціонування (еволюцію) універсальною мовою. Це досягається відшуканням ізоморфізму різних досліджуваних специфічними засобами багатьох наук явищ, які можна, проте, описати однаковими (однотипними) моделями. Отже, виявляючи єдину модель, спільну для зазначених явищ, синергетика та кібернетика переносять результати однієї галузі науки в інші.

Але між синергетикою та кібернетикою існують і певні відмінності. Кібернетика та різноманітні напрямки загальної теорії систем вивчають процеси підтримання рівноваги (процеси гомеостазису) у системах за рахунок зворотних зв'язків, а також процеси управління такими системами. Кібернетика намагається описувати нелінійні процеси еволюції систем за допомогою лінійних моделей (принаймні на окремих етапах, коли це можливо).

У синергетиці на відміну від кібернетики акцент робиться не на процесах управління та обміну інформацією, а на принципах побудови, організації, розвитку та самоускладнення систем і їхній еволюції. Синергетика досліджує принципово нерівноважні (такі, що перебувають далеко від стану рівноваги) системи, принципово нелінійні (такі, що за певних умов деякі збурення — внутрішні або зовнішні — можуть привести систему до принципово нових станів, до виникнення нових стійких структур) процеси еволюції систем.

Головні відмінності між синергетикою та кібернетикою разом із системними дослідженнями наведено в табл. 14.1.

Таблиця 14.1

СПІВВІДНОШЕННЯ СИСТЕМНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І СИНЕРГЕТИКИ

Кібернетика та системні дослідження	Синергетика
1. Акцент робиться на статистиці систем, на морфологічному та функціональному опису	1. Акцентується увага на процесах еволюції, розвитку та руйнування систем
2. Велике значення надається впорядкованості, рівновазі, процесам гомеостазису	2. Вважається, що нерівноважні стани, хаос відіграють важливу роль у процесах розвитку та руху систем
3. Вивчаються процеси організації та управління	3. Досліджуються процеси самоорганізації, самоускладнення систем, виникнення «порядку із хаосу»
4. Найчастіше намагаються звести опис систем до лінійних моделей	4. Підкреслюється принципова нелінійність складних систем та неадекватність їх опису лінійними моделями

З погляду синергетики процеси у відкритих нерівноважних системах характеризуються принциповою нелінійністю, присутністю зворотних зв'язків, що зумовлює появу якісно нових можливостей здійснення керуючого впливу на систему.

Синергетика дала змогу по-новому зрозуміти відмінність між випадковими та детермінованими процесами. Довгий час вважалось, що існують лише два класи об'єктів. Перший становлять детерміновані. Якщо відомий аналітичний вигляд закону, за яким вони функціонують, то спрогнозувати їхнє поведіння можна практично на довільний часовий інтервал. До другого класу належать стохастичні об'єкти, поведіння яких описується деяким випадковим процесом (є його реалізацією). Для цього класу процесів неможливо

зробити детермінований прогноз, але якщо ми достатньо довго спостерігатимемо за їхнім поведінням, то зможемо знайти відповідні розподіли ймовірності та обчислити статистичні характеристики (середні, дисперсії, інтервали довіри тощо) і спрогнозувати їхнє поведіння в «середньому» з певною ймовірністю.

Але дослідження кількох останніх десятиріч показали, що існує ще один важливий клас об'єктів. Формально вони є детермінованими, тобто якщо ми точно знаємо їхній поточний стан, то можемо спрогнозувати подальше їхнє поведіння, але тільки на доволі обмежений проміжок часу. Навіть як завгодно мала неточність у визначенні поточного стану таких систем

приводить з часом до розбігання їхніх можливих траєкторій розвитку. Система починає поводитися хаотично, початкові відхилення з часом наростають і незначні причини призводять до вельми відчутних наслідків. Такі системи, що дуже чутливі до початкових умов, дістали назву **хаотичних**.

Отже, підсумовуючи сказане, доходимо висновку, що правила, які визначають поведіння складних систем, істотно відрізняються від тих, за якими функціонують рівноважні системи і які є основою традиційних класичних методів аналізу систем. Тому саме *синергетика, яка акцентує увагу на явищах еволюції у відкритих нерівноважних системах, на виникненні порядку із хаосу, явищах самоорганізації*, зі своїм міждисциплінарним арсеналом методів та алгоритмів може стати адекватним інструментом для аналізу складних динамічних процесів, що відбуваються в сучасному суспільстві та економіці.

До основних понять синергетики належать поняття *структури, хаосу, еволюції, дисипативної системи, дивного атрактора, точок бифуркації, фракталів* тощо, які ми розглянемо далі.

2. Основні поняття теорії складних систем

Відкриті системи та дисипативні структури. Синергетика вивчає відкриті нерівноважні системи. Нагадаємо, що *відкрита система* — це система, що обмінюється речовиною, енергією й інформацією з навколишнім середовищем.

Розглянемо властивості відкритих систем, що перебувають далеко від стану рівноваги.

- Такі системи нестійкі, і тому повернення до початкового стану для них є необов'язковим. У деякій точці, що називається *точкою бифуркації* (розгалуження), поведіння системи стає неоднозначним.

- За наявності нестійкості змінюється роль зовнішніх впливів. За певних умов незначний вплив на відкриту систему може призвести до значних та непередбачуваних наслідків.

- У відкритих системах, далеких від рівноваги, виникають ефекти узгодження, коли елементи системи корелюють, узгоджують своє поведіння. Таке кооперативне, погоджене поведіння характерне для систем різних типів: атомів та молекул, клітин та живих істот, економічних об'єктів та соціальних груп тощо.

- У результаті погодженої взаємодії відбуваються процеси впорядкування, виникнення з хаосу певних структур, перетворення й ускладнення систем. Чим більше відхилення від стану рівноваги, тим сильніше охоплення кореляціями та взаємозв'язками, тим вища узгодженість процесів, що відбуваються навіть у віддалених областях і, на перший погляд, не зв'язані один з одним.

Відкриті системи, в яких спостерігається приріст ентропії, називають дисипативними. У дисипативних системах енергія впорядкованого руху переходить в енергію невпорядкованого (хаотичного) руху, тобто відбувається дисипація. Якщо закрити систему виведено зі стану рівноваги, то вона завжди намагається набути стану з максимальною ентропією. У відкритій системі вплив ентропії може врівноважити її зростання в самій системі, і тому існує ймовірність виникнення стаціонарного стану.

Якщо ж вплив ентропії перевищує її внутрішнє зростання, то виникають і розростаються до макроскопічного рівня великомасштабні флуктуації, а за певних умов у системі починають відбуватися самоорганізаційні процеси, спрямовані на створення впорядкованих структур.

Отже, у відкритих системах, що обмінюються з навколишнім середовищем потоками речовини чи енергією, однорідний стан рівноваги може втрачати стійкість і незворотно переходити у стаціонарний стан, стійкий щодо малих збурень. Такі стаціонарні стани дістали назву **дисипативних структур**.

Термін «дисипативна структура» запропонував І. Пригожин, засновник «бельгійської школи» синергетики, яка розвиває термодинамічний підхід до самоорганізації. Основне

поняття синергетики Хакена — поняття структури як стану, що виникає в результаті когерентного (погодженого) поведіння великої кількості частин, — бельгійська школа замінює більш спеціальним поняттям дисипативної структури.

Виникнення дисипативних структур має граничний характер. Нерівноважна термодинаміка пов'язала граничний характер із нестійкістю, довівши, що нова структура завжди є результатом розкриття нестійкості внаслідок флуктуацій. Отже, ідеться про «порядок через флуктуації».

Таким чином, дисипативні структури є результатом розвитку власних внутрішніх нестійкостей у системі. А процеси самоорганізації можливі, коли відбувається обмін енергією і масою з навколишнім середовищем, тобто підтримується стан поточної рівноваги, причому втрати на дисипацію компенсуються ззовні.

Хаос і порядок. Поняття «порядок» тісно пов'язане з поняттям структури. Іншими словами, порядок передбачає наявність певної структури — ключового поняття для всіх наук, що вивчають ті чи інші аспекти процесів самоорганізації. Отже, структура припускає певну «жорсткість» об'єкта — здатність зберігати тотожність самому собі за різних зовнішніх і внутрішніх змін.

Інтуїтивно поняття структури протиставляється поняттю хаосу як стану, що цілком позбавлений будь-якої структури. Однак, як свідчать новітні дослідження, таке уявлення про хаос є настільки ж поверховим, наскільки поверховим є уявлення про фізичний вакуум у теорії поля як про порожнечу: хаос може бути різним, мати різний ступінь упорядкованості, різну структуру тощо.

Тому в синергетиці під **хаосом** розуміють нерегулярний рух, що описується детерміністичними рівняннями. Його ще називають динамічним хаосом. Дослідження різних сценаріїв переходу до динамічного хаосу пов'язане з аналізом властивостей так званих дивних атракторів.

Атрактори. Вивчаючи динаміку систем, їх часто описують системою диференціальних рівнянь. Зображення розв'язків цих рівнянь як руху деякої точки у просторі з розмірністю, яка дорівнює кількості змінних, називають **фазовими траєкторіями системи**. Аналіз поведінки фазової траєкторії (у сенсі її стійкості) показує, що існують випадки, коли всі розв'язки системи зосереджуються зрештою на деякій замкненій підмножині. Така підмножина називається **атрактором** (від англ. «to attract» — притягувати).

Атрактор має певну «область притягання» (множину початкових точок). Із часом усі фазові траєкторії, що зародилися у множині початкових точок, тяжіють (намагаються збігтися) саме до цього атрактора. Рух точки в таких випадках має періодичний характер.

Основні типи атракторів такі:

- стійкі граничні точки;
- стійкі цикли (траєкторія тяжіє до деякої замкненої кривої);
- тори (до поверхні яких наближається траєкторія).

Нехай, наприклад, точка, рухаючись у фазовому просторі, залишає за собою слід, тоді динамічному хаосу відповідає клубок траєкторій, зображений на рис. 14.1.

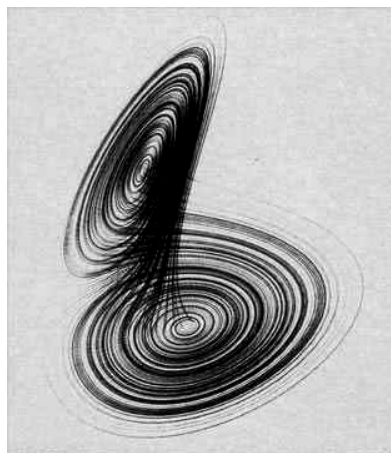


Рис. 14.1. Зображення дивного атрактора у тривимірному фазовому просторі

Для сталих коливань, що відповідають динамічному хаосу, запропоновано назву **дивний атрактор**. Рух точки на таких атракторах є нестійким, хистким, будь-які дві

траєкторії на них завжди розбігаються, мала зміна початкових умов приводить до різних шляхів розвитку. Іншими словами, *динаміка систем із дивними атракторами є хаотичною*.

Ці атрактори дістали таку назву, бо вони у фазовому просторі справді виглядають незвично, являючи собою ні точку, ні періодичну траєкторію, ні поверхню. Їх порівнюють іноді з поверхнею, що складається з нескінченної множини шарів. А головне полягає в тому, що взятий навмання розв'язок блукатиме в дивному атракторі і через значний проміжок часу пройде досить близько до будь-якої його точки. Тут дуже високий ступінь чутливості до початкових умов.

Приклад. Розглянемо атрактор Лоренца. Американський метеоролог Е. Лоренц виявив складне поведіння порівняно простої динамічної системи, що складається з трьох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку й описує конвекцію повітря:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma(x + y), \\ \frac{dy}{dt} = -xz + rx - y, \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz, \end{cases}$$

де σ , r , b — деякі параметри.

При певних значеннях параметрів траєкторія системи поведилася настільки химерно, що здавалась випадковою та хаотичною.

Комп'ютерний аналіз системи Лоренца привів до принципового результату: з переходом до режиму динамічного хаосу, тобто неперіодичного руху в детермінованих системах, де майбутнє однозначно визначається минулим, горизонт прогнозування поведінки системи стає обмеженим. Річ у тім, що коли ми знову візьмемо дві близькі траєкторії, то вони розбігаються.

Швидкість розбігання визначається так званим *показником Ляпунова*, і від цієї величини залежить інтервал часу, на який можна подати прогноз. При цьому для кожної системи існує свій горизонт прогнозу.

Унікальною властивістю дивних атракторів є масштабна самоповторюваність. Це означає, що, збільшуючи ділянку атрактора, яка містить нескінченну кількість кривих, переконаємося: атрактор на ній подібний до великомасштабного подання його частини. Об'єкти, що мають здатність нескінченно повторювати власну структуру на мікрорівні, дістали спеціальну назву — *фрактали*.

Фрактали. Властивість об'єктів виглядати в кожному як завгодно малому масштабі приблизно однаково називають *масштабною інваріантністю*, а множини, що мають цю властивість, — *фракталами* (від англ. «fractal» — дробовий, неповний, частковий). **Фрактали** — це геометричні об'єкти з так званою *дробовою розмірністю*. Дивний атрактор Лоренца — один із таких фракталів.

Часто вважають, що розмірність об'єкта (тіла, поверхні, чи кривої) є його внутрішньою характеристикою. Але засновник фрактальної геометрії Б. Мандельброт звернув увагу на те, що розмірність об'єкта може залежати від спостерігача, точніше від зв'язку об'єкта із зовнішнім світом.

Приклад. Уявімо, що ми розглядаємо клубок ниток. Коли відстань, що відокремлює нас від клубка, досить велика, ми бачимо клубок як точку, позбавлену будь-якої внутрішньої структури, тобто геометричний об'єкт з евклідовою (інтуїтивно сприйнятою) розмірністю 0.

Наблизившись до клубка на деяку відстань, ми бачитимемо його як плоский диск, тобто як геометричний об'єкт розмірності 2. Наблизившись до клубка ще на кілька кроків, ми побачимо його у вигляді кульки, але не зможемо розрізнити окремі нитки — клубок стане геометричним об'єктом розмірності 3. З подальшим наближенням до клубка ми побачимо, що він складається з ниток, тобто евклідова розмірність клубка стане такою, що дорівнює 1. Нарешті, якби наші очі розрізняли окремі атоми, то, проникнувши всередину нитки, ми побачили б окремі точки — клубок розсипався б на атоми, став геометричним об'єктом розмірності 0.

Процес побудови фрактала ілюструє рис. 14.2.

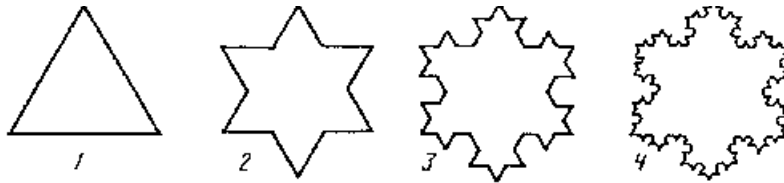


Рис. 14.2. Приклад побудови фрактала — крижинки Коха

Мандельброт запропонував за міру «нерегулярності» (зрізаності, звивистості) взяти розмірність Безиковича—Хаусдорфа. Ця розмірність завжди не менша за евклідову і збігається з нею для регулярних геометричних об'єктів (кривих, поверхонь і тіл, досліджуваних у евклідовій геометрії).

Розглянемо ідею, яку покладено в основу обчислення зазначеної розмірності. Поділимо відрізок прямої на N рівних частин. Тоді кожен частину можна вважати копією всього відрізка, зменшеною в r раз. Очевидно, що N та r пов'язані між собою співвідношенням $Nr = 1$. Якщо квадрат розбити на N рівних квадратів з площею, у $1/r^2$ раз меншою за його площу, то аналогічне співвідношення запишеться у вигляді $Nr^2 = 1$. А коли куб розбити на N рівних кубів, об'єм яких у $1/r^3$ раз менший за його об'єм, то відповідне співвідношення набере вигляду $Nr^3 = 1$. У загальному випадку можемо записати:

$$Nr^d = 1, \quad (14.1)$$

де d — розмірність об'єкта; N — кількість рівних підоб'єктів, на яку поділено вихідний об'єкт з коефіцієнтом подібності r .

Якщо деякий вихідний об'єкт (множину) можна розбити на N неперетинних підоб'єктів (підмножин), утворених масштабуванням оригіналу з коефіцієнтом подібності r , і d буде дробовим числом, то такий об'єкт (множину) називають самоподібним фракталом, а величину d — *фрактальною розмірністю*, явний вигляд якої знаходимо логарифмуванням обох частин виразу (14.1):

$$d = \frac{\log N(r)}{\log 1/r}. \quad (14.2)$$

Різниця між розмірністю Безиковича—Хаусдорфа та Евкліда — «надлишок розмірності» — може бути мірою відмінності геометричних образів від регулярних. Наприклад, плоска траєкторія руху броунівської частинки має розмірність, більшу від 1, але менше від 2: ця траєкторія вже не звичайна гладка крива, але ще не плоска фігура. Розмірність Безиковича—Хаусдорфа дивного атрактора Лоренца більша за 2, але менша за 3: атрактор Лоренца вже не гладка поверхня, але ще не об'ємне тіло.

Багато природних об'єктів є фракталами (наприклад, берегові смуги, хмари, крижинки, дерева, скелі, нервова та кровоносна системами тварин і людини і т. ін.). На перший погляд може здатися, що теорія фракталів має суто теоретичну цінність і зовсім не стосується дослідження реальних економічних об'єктів. Проте насправді часові ряди багатьох фінансово-економічних показників (валютних курсів, курсів акцій) мають фрактальну структуру, і тому з метою їх дослідження можна використовувати апарат фрактального аналізу, зокрема R/S аналіз, який базується на обчисленні статистики Херста, що є мірою випадковості часового ряду (див. наступну тему).

Точки біфуркації. Динамічні системи, як правило, повільно змінюють характер свого поведіння внаслідок незначної зміни внутрішніх або зовнішніх параметрів. Однак можуть існувати такі критичні значення параметрів, при яких система зазнає якісної перебудови і, відповідно, різко змінюється динаміка системи, наприклад втрачається її стійкість. Такі критичні значення параметрів називаються *точками біфуркації*.

Втрата стійкості відбувається, як правило, переходом від точки стійкості до стійкого циклу (м'яка втрата стійкості), виходом траєкторії зі стійкого стану (жорстка втрата стійкості), народженням циклів із подвоєним періодом тощо. З подальшою зміною параметрів можливе виникнення у фазовому просторі таких топологічних структур, як тор, а далі — дивних атракторів, тобто хаотичних процесів.

Поведіння всіх систем, що самоорганізуються, у точках біфуркації характеризується загальними закономірностями. Розглянемо найважливіші з них.

- Точки біфуркації часто провокуються зміною управляючих параметрів або підсистеми управління, що веде систему до нового стану.

- Потенційних траєкторій розвитку системи багато, і тому точно спрогнозувати, до якого стану перейде система після проходження точки біфуркації, неможливо. Це пояснюється тим, що вплив середовища має випадковий характер.

- Вибір траєкторії розвитку може бути також пов'язаний з життєздатністю і стійким типом поведінки системи. Відповідно до принципу стійкості серед можливих форм розвитку реалізуються лише стійкі, а хисткі якщо й виникають, то швидко руйнуються.

- Підвищення розмірності та складності системи спричинюється до збільшення кількості станів, за яких може відбуватися стрибок (катастрофа), і кількості можливих шляхів розвитку, тобто чим різномірніші елементи системи і складніші її зв'язки, тим вона хисткіша.

- Чим більше система нерівноважна, тим більшу кількість можливих шляхів розвитку вона може вибирати в точці біфуркації.

- Два близькі стани можуть породити зовсім різні траєкторії розвитку.

- Однакові траєкторії розвитку можуть реалізовуватися неодноразово. Наприклад, серед соціальних систем є суспільства, що багаторазово обирали тоталітарні сценарії розвитку.

- Часова межа катастрофи визначається «принципом максимального зволікання»: система робить стрибок тільки тоді, коли в неї немає іншого вибору.

- У результаті розгалуження (біфуркації) виникають граничні цикли — періодичні траєкторії у фазовому просторі, кількість яких тим більша, чим більш структурно хисткою є система.

- Катастрофа змінює організованість системи, причому не завжди в бік збільшення.

Отже, у процесі руху від однієї точки біфуркації до іншої відбувається розвиток системи. У кожній точці біфуркації система вибирає шлях розвитку, траєкторію свого руху.

У точці біфуркації відбувається катастрофа — перехід системи від області притягання одного атрактора до іншого. Як атрактор може виступати і стан рівноваги, і граничний цикл, і дивний атрактор (хаос). Систему притягає один із атракторів і вона в точці біфуркації може стати хаотичною і зруйнуватися, перейти до стану рівноваги або вибрати шлях формування нової впорядкованості.

Якщо система притягається станом рівноваги, вона стає закритою і до чергової точки біфуркації живе за законами, властивими закритим системам. Якщо хаос, породжений точкою біфуркації, затягнеться, стане можливим руйнування системи, внаслідок чого її компоненти рано чи пізно вийдуть як складові до іншої системи і притягатимуться вже її атракторами. Якщо, нарешті, як у третьому випадку, система притягається яким-небудь атрактором відкритості, то формується нова дисипативна структура — новий тип динамічного стану системи, за допомогою якого вона пристосовується до умов навколишнього середовища, що змінилися.

3. Самоорганізація та етапи еволюції складних систем

У процесі свого розвитку довільна система проходить дві стадії: *еволюційну* (або адаптаційну) і *революційну* (стрибок, катастрофа). Під час розгортання еволюційного процесу відбувається повільне нагромадження кількісних і якісних змін параметрів системи та її компонентів, відповідно до яких у точці біфуркації система вибирає один із можливих для неї атракторів. У результаті цього відбувається якісний стрибок, і система формує нову дисипативну структуру, що відповідає вибраному атрактору.

Еволюційний етап розвитку характеризується наявністю механізмів, що гасять сильні флуктуації системи, її компонентів або середовища і повертають її до стійкого стану, властивого їй на цьому етапі. Через нагромадження в системі, її компонентах та зовнішньому середовищі змін здатність системи до адаптації спадає і зростає нестійкість. Поступово в системі зростає ентропія. Постає гостра суперечність між старим і новим у системі, а з досягненням параметрами системи і середовища біфуркаційних значень нестійкість стає максимальною і навіть малі флуктуації приводять систему до катастрофи — стрибка.

На цій фазі розвиток має непередбачуваний характер, оскільки він зумовлюється не тільки внутрішніми флуктуаціями (силу і спрямованість яких можна спрогнозувати, проаналізувавши історію розвитку і сучасний стан системи), а й зовнішніми. Це вкрай ускладнює, а то й унеможливує прогноз. Іноді висновки про майбутній стан і поведінку системи можна зробити, скориставшись «законом маятника» — стрибок може

сприяти вибору атрактора, «протилежного» минулому. Після формування нової дисипативної структури система знову стає на шлях плавних змін, і цикл повторюється.

Але насправді розвиток реальних систем включає в себе не тільки прогресивні атрактори, а й атрактори деградації (які з часом можуть змінитися прогресом, а можуть і привести систему до краху) та руйнування. Розглянемо, коли можливі деградація та руйнування системи.

Деградація системи може відбутися за таких умов.

1. Загальносистемні умови:

- система гальмує процес переходу: зі збільшенням кількості нових ознак вона не змінює відповідно свого поведіння через що ентропія її зростає, система перестає виконувати свої функції і дезорганізується;

- система вибирає неконструктивну траєкторію або сценарій розвитку, наприклад стає закритою;

- різко зменшується кількість компонентів, необхідних для функціонування;

- зростає кількість неефективних («баластових») компонентів.

2. Умови, що пов'язані з підсистемою управління:

- підсистема управління в точці біфуркації намагається перевести систему на траєкторію, що не відповідає минулому та поточному станам системи (наприклад, «перестрибує» через етапи), або система вибирає один сценарій і відповідну йому дисипативну структуру, а підсистема управління «допомагає» їй будувати іншу;

- підсистема управління (а не сама система, як у першому випадку) гальмує процес переходу в точку біфуркації;

- підсистема управління після катастрофи не змінюється або змінюється недостатньо й у результаті тягне систему на старий, віджилий атрактор;

- підсистема управління недостатньо узгоджена з підсистемами, компонентами або системою в цілому (наприклад, нав'язує системі стрибок при відсутності об'єктивних умов для нього);

- для досягнення загальносистемних цілей ігнорується необхідність узгодження їх із цілями підсистем, тобто робиться спроба досягти загальносистемного оптимуму за рахунок підсистем;

- підсистема управління не виконує своїх функцій або гіпертрофує їх.

Руйнування системи може відбутися якщо:

- зазначені щойно умови деградації існують протягом тривалого часу, а зусилля з коригування структури й поведінки системи або підсистеми управління недостатні, несвоєчасні, нерезонансні із системою тощо;

- зовнішнє середовище здійснює сильно впливає на систему;

- внутрішні флуктуації руйнують зв'язки між компонентами системи;

- внаслідок зовнішніх або внутрішніх флуктуацій система втрачає елементи, замінити які неможливо.

У процесі розвитку, що складається з циклічно повторюваних стадій еволюції та стрибків, система постійно переходить зі стійкого стану до хисткого та навпаки. Структурна і функціональна стійкість формується у процесі адаптації системи до нових зовнішніх і внутрішніх умов, що змінилися в результаті катастрофи, і зберігається протягом більшої частини еволюційної стадії.

Підвищенню стійкості системи сприяє дублювання головних її функцій. Інший підхід до підвищення стійкості системи в період еволюційного розвитку полягає у збереженні визначеної спеціалізації підсистем.

Наприклад, багато систем (зокрема, соціальні, економічні) мають у своєму складі «оперативні» та «консервативні» підсистеми. Перші з них наближаються до середовища, намагаючись «гасити» його негативні флуктуації та використовувати позитивні. Другі — віддаляються від середовища та намагаються зберегти якісну визначеність системи.

Коли зміни параметрів системи під впливом зовнішніх або внутрішніх флуктуацій перевищують її адаптаційні можливості, настає стан нестійкості (точка біфуркації), переломний для розвитку системи момент. Нестійкість часто виникає у відповідь на введення в систему нового компонента.

У точці біфуркації нестійкість підсилюється через те, що в системах завжди присутні флуктуації, які гасяться у стійкому стані. Але в результаті нелінійних процесів, які виводять параметри системи за критичні значення, такі флуктуації підсилюються і можуть спричинити стрибкоподібний перехід до нового стійкого стану з меншою ентропією, після чого цикл «плавний розвиток—стрибок», «еволюція—революція», «стійкість—нестійкість» повторюється.

Отже, стійкість та нестійкість є однаково необхідними у процесі розвитку будь-якої системи. Абсолютно хистка система не може протистояти флуктуаціям, не здатна до адаптації і швидко руйнується. Проте надто стійка система, придушуючи будь-які флуктуації, консервує свою структуру й поведінку і тому не здатна змінитися якісно, вона позбавлена можливості розвитку, і її руйнування стає лише справою часу. Обидва типи систем приходять до хаосу, різниця між ними полягає в часі, що проходить до вибухового зростання ентропії.

Що ж є рушієм розвитку, що змушує систему змінювати свою якість? Висновки концепції самоорганізації значною мірою збігаються з висновками діалектики. Найбільш істотним джерелом процесу розвитку виступають суперечності. До найбільш істотних суперечностей можна віднести:

1. *Суперечність між функцією і ціллю системи.*
2. *Суперечність між потребами системи в ресурсах і можливістю їх задоволення.*
3. *Суперечність між прагненням до порядку і хаосом* (причому чим далі зайшло їхнє протистояння, тим вищий ступінь організованості системи, і навпаки).
4. *Суперечність між прагненням системи до встановлення стійкого стану і засобами його досягнення.* Останні забезпечують зміни та розвиток системи, що неминуче приводить її до нестійкого стану. Це відбувається в такий спосіб: система адаптується до середовища і внаслідок цього стає більш чутливою до флуктуацій, посилення флуктуацій викликає нестійкість, яка може спричинити стрибок).
5. *Суперечність між цілями системи і цілями її компонентів.*
6. *Суперечність між процесами функціонування і розвитку.* Хоча для того, щоб розвиватися, система має функціонувати і не може функціонувати, не розвиваючись, у точці біфуркації ці процеси стають гостро суперечливими. Інтереси розвитку та існування системи вимагають зміни її якості, а отже, зламу функціональних процесів, а в еволюційний період процеси функціонування стримують розвиток, згладжуючи флуктуації.
7. *Суперечність між функціонуванням і структурою.* В еволюційний період процеси функціонування більш пластичні, ніж структура системи, але їхня зміна, що здійснюється в інтересах системи, нашоухується на «жорсткість» незмінної структури. У момент стрибка структура змінюється дуже швидко, а функціонування відстає.
8. *Суперечність між компонентами системи, які, нагромаджуючись, даються взнаки і на макрорівні.*

Більшість суперечностей системи в еволюційний період згладжуються: зовнішнім ентропійним тенденціям і суперечностям тут протистоїть адаптація, а внутрішнім — функціонування («робота») системи.

Це досягається за рахунок належного управління. Проте свою неентропійну роль управління може відігравати тільки за наявності адекватних зворотних зв'язків. У протилежному випадку підсистема управління може генерувати руйнівні або сприятливі для деградації системи флуктуації, що сприяють прискоренню настання порогу самоорганізації. Проте навіть ідеальне управління в найкращому разі здатне лише пом'якшити суперечності, що виникають.

Максимальні можливості щодо розв'язання назрілих суперечностей настають у момент катастрофи, а далі суперечності поступово нагромаджуються, і цикл повторюється. Можливості згладжування і розв'язання суперечностей забезпечуються трьома способами: мінливістю, спадковістю (відтворенням) і добром, що відбувається у процесі конкуренції.

Властивість мінливості дає змогу системі варіювати на еволюційній стадії її поведінку, а на біфуркаційній — структуру. «Спадковість» (відтворення, здатність майбутнього залежати від минулого) вводить процеси мінливості у визначені межі, які зумовлені минулою структурою, станом і функціонуванням системи. А добір сприяє виживанню тих систем, в яких структура і функціонування, зумовлені минулим розвитком («спадковість»), здатні змінюватися відповідно до нових умов (мінливість) і адаптуватися до них.

Отже, адаптація не є єдиним чинником добору, і тим більше його наслідком, а являє собою одну з його умов. У точці біфуркації добір має тотальний характер — йому підлягають системи, їхні компоненти від верхнього до нижнього рівня, структури, взаємозв'язки і взаємини, способи функціонування; а в проміжку між точками біфуркації він відбувається передусім на мікрорівні, згодом наближаючись до макрорівня. Добір здійснюється у процесі конкуренції, що зумовлюється обмеженістю ресурсів і завжди призводить до нелінійних процесів.

Зміна еволюційного і біфуркаційного етапів розвитку систем, їхньої стійкості і нестійкості відбувається циклічно. Кожна система має не тільки циклічні процеси, зумовлені її природою, а й цикли, що нав'язуються їй середовищем (наприклад, зміна

пори року, дня і ночі, місячних фаз, циклів економічної кон'юнктури і т. ін.). При цьому «зовнішні» цикли більш стабільні і стійкі, а цикли внутрішнього походження можуть змінюватися під їхнім впливом у результаті синхронізації — здатності систем найрізноманітнішої природи виробляти єдиний ритм спільного існування, незважаючи навіть на слабкий взаємозв'язок між ними.

Процеси самоорганізації в економічних системах реалізуються за допомогою механізму зворотних зв'язків. Якщо, скажімо, як кібернетичну систему розглядати підприємство, то флуктуації, що виникають під впливом зовнішнього середовища (зміни законодавства, зростання інфляції, коливання валютного курсу, динаміки відсоткових ставок, зміни ринкової кон'юнктури, зміни технологій, дії конкурентів тощо), можуть деякий час компенсуватись за допомогою механізму негативних зворотних зв'язків, і система, незважаючи на коливання (сукупного попиту, обсягів виробництва, ринкової позиції та частки ринку, рівня інвестицій, обсягів прибутку), повертається до стану динамічної рівноваги. Але з досягненням критичних значень збурювальних параметрів, за рахунок дії позитивних зворотних зв'язків, відбувається стрімке, лавиноподібне зростання флуктуацій. Вони охоплюють всю систему, усі її блоки — управління, виробництво, фінанси, збут, постачання, організацію праці тощо. Тоді система або руйнується, поглинаючись іншими системами, або переходить на іншу траєкторію розвитку. При цьому істотно змінюються її структура, внутрішні взаємозв'язки, цілі та параметри функціонування тощо.

Отже, розвиток соціально-економічних систем, як і інших складних систем, відбувається через процеси самоорганізації, що містять періодичні зміни фаз руйнування старих і виникнення нових структур (за рахунок дії позитивних зворотних зв'язків), а також їх закріплення та підтримання у порівняно стійкому стані (за рахунок негативних зворотних зв'язків).