

Тема 4. Нелінійна динаміка і синергетичний підхід.

Закономірності та механізми функціонування й розвитку складних систем досліджувалися в рамках системного підходу, кібернетики та інших міждисциплінарних напрямків. Однак синергетика має свою самостійну предметну область досліджень: вона вивчає механізми і процеси самочинного, спонтанного виникнення впорядкованих просторових, часових і просторово-часових структур у складних системах різної природи, тобто синергетика – це теорія самоорганізації. Які ж інші особливі характеристики повинна мати складна система, щоб в неї виникли передумови для протікання процесів самоорганізації? Передусім це відкритість системи, яка визначається її взаємодією із зовнішнім середовищем. Об'єктами обміну (метаболізму) відкритої системи із середовищем є речовина, енергія й інформація. Ізольованими прийнято називати системи, які не обмінюються із середовищем речовиною й енергією; закритими – системи, які не обмінюються з оточуючим середовищем речовиною, але обмінюються енергією. І хоча ізольовані і закриті системи практично не існують у природі, ці певною мірою ідеальні, штучно створені об'єкти найчастіше є необхідними елементами системних досліджень, тому що вони являють собою спрощені схеми реальних систем. Щоб відкрита система успішно функціонувала в оточуючому середовищі, потрібний певний рівень її пристосованості, який відбивається у зв'язках системи і середовища. Подібний ступінь пристосованості називають узгодженістю системи із середовищем. Рівень узгодженості суттєво впливає на еволюцію та життєвий цикл системи. Динамічний аспект здатності системи пристосовуватися до змін внутрішніх і зовнішніх умов відбивається у її адаптивних властивостях. При цьому адаптивна система може ефективно перебудовувати свою внутрішню структуру та змінювати параметри стану в заданому напрямку. Поряд із цим існує безліч систем із жорсткою структурою, які не потребують адаптації, тому що в них первісно закладена інваріантність основної частини системи від обурюючих впливів. 32 Інша суттєва

характеристика систем, які здатні до самоорганізації, – нелінійність. Домінуюча раніше у багатьох науках лінійна парадигма передбачала застосування лінійного математичного апарату, який має відносну простоту, універсальність і ефективність. Використання лінійних залежностей пов'язано з описом процесів, які проходять однаково при різних зовнішніх впливах: зі збільшенням інтенсивності впливів відбуваються тільки кількісні зміни, нових якостей не виникає. Але більшість реальних явищ є нелінійними, і більш інтенсивні зовнішні впливи приводять до якісно нової картини процесу. У математиці нелінійними називають такі рівняння, які мають декілька (спектр) різних рішень. Ця неунітарність рішень відбиває численність можливих способів поведінки системи, безліч шляхів еволюції. Отже, нелінійними системам притаманні багатоваріантність і альтернативність розвитку: в кожний даний момент система має набір потенційних альтернативних структур і актуалізується (реалізується) одна з них – шляхом випадкового вибору в критичний період розвитку системи. Поняття лінійність – нелінійність є складними й багатограними і не зводяться лише до особливостей лінійного та нелінійного математичного апарату, що їх описує. Їхній порівняльний аналіз представлений у табл. 1.1 (складено за джерелом [7]). Остання фундаментальна властивість лінійних систем – принцип суперпозиції (накладення) – відповідає тій точці зору, що загальний ефект складного процесу являє собою суму ефектів, які викликані кожним окремим фактором, за умовою, що останні взаємно не впливають один на одного. Згідно із цим принципом складаються (накладаються) лише адитивні властивості і величини, тобто такі, які в рамках певного цілого дорівнюють сумі своїх частин, незалежно від способу їхнього утворення. Ідея про всезагальність нелінійних закономірностей вперше була висунута Л. Мандельштамом в 30-ті роки минулого століття. І хоча і нині все ще залишаються міцними стандарти наукового пізнання, які були вироблені для вивчення стабільних систем, що підлягають лінійним законам, сучасна наука обґрунтувала їхню обмеженість при аналізі систем, що самоорганізуються. Формується нова методологія

пізнавальної діяльності, яка отримала назву «нелінійне мислення» (див., наприклад, джерела [53-55]) Ще одна риса й умова виникнення систем, що самоорганізуються, – їхня нерівноважність. Поширений раніше в науці класичний підхід ставив у центр досліджень систем їхні рівноважні стани. Будьяке відхилення від рівноваги розглядалося як небажане, тому основна увага вчених була зосереджена на пошуку умов і чинників, що повертають систему в рівновагу. Переважало вивчення механізмів від'ємного зворотного зв'язку. Нерівноважність вважалась тимчасовим, перехідним станом між тривалими рівноважними станами. Однак при вирішенні проблем, пов'язаних з організацією ефективного управління системами, важливо те, що рівноважні системи не здатні до самоорганізації й ефективного розвитку. Якщо система є стійкою, малі флуктуації (випадкові відхилення від рівноважного стану) можуть привести лише до незначних змін у системі. Управлінські важелі в таких системах не здатні забезпечити прискорене, стрибкоподібне зростання ефективності. 34 У нерівноважних системах істотним моментом є різниця потенціалів між об'єктами (суміжними точками, системою і зовнішнім середовищем, окремими частинами системного цілого). Тому будь-яка нерівномірність (або нерівноважність) становить рушійну силу змін: у результаті механічної різниці потенціалів відбувається механічний рух; завдяки хімічній різниці потенціалів протікають хімічні реакції і т. ін. Причому відхилення від рівноваги може виникати як унаслідок спрямованого впливу на систему ззовні, так і бути обумовлено випадковими відхиленнями у самій системі. Якщо флуктуації, що виникають, є незначними, то система під впливом від'ємних зворотних зв'язків може повернутися до попередньої рівноважної структури. Але при переході певного критичного порога флуктуації, багаторазово посилюючись механізмами позитивного зворотного зв'язку, можуть привести до нового стану, до виникнення нових структур. Принципово різна поведінка рівноважних і нерівноважних систем дозволяє говорити про два різних типи самоорганізації. Наприклад, К. Майнцер описує їх у термінах термодинаміки: «Ми розрізняємо два види фазових переходів

(самоорганізації) для впорядкованих станів. Консервативна самоорганізація означає фазовий перехід оборотних структур у стані теплової рівноваги... Дисипативна самоорганізація – це фазовий перехід необоротних структур удалині від теплової рівноваги» [55, с. 50]. Терміном «дисипативні» І. Пригожин назвав системи й структури, які утворюються шляхом дисипації (розсіювання) енергії, що використана системою, і отримання із зовнішнього середовища нової енергії. У монографії [56] сутність процесів дисипації образно охарактеризована як «переструктурування чужого у своє і розсіювання зайвого». Часто як приклад дисипативної структури наводиться структурування рідини у вигляді малих чарунок, які називають «чарунками Бенара». Вони з'являються, коли різниця температур у нижній і верхній площинах, що обмежують шар рідкої фази, перевищує певне критичне значення і хаотичний рух молекул змінюється самоузгодженим. Існують різноманітні дисипативні структури, що утворюються в активних фізичних, хімічних, біологічних і соціальних середовищах. Дисипативними є всі об'єкти живої природи. Мають дисипативну складову і соціально-економічні системи: родина, підприємство, держава. 35

Поняття й уявлення синергетики пов'язані передусім із вивченням упорядкованості поведінки; її центральні категорії – «порядок» і «хаос». Конкретний зміст цих понять визначається специфікою окремої галузі знань. Так, наприклад, у термодинаміці їхнє співвідношення визначається й вимірюється зростанням ентропії як показником разупорядкованості. Синергетику називають найбільш повною, інтегральною теорією порядку і хаосу тому, що вона досліджує різні фази (рівні) порядку та прояви різної ролі хаосу на цих етапах порядкуутворення. «Порядок із хаосу» – таку назву має одна з піонерних наукових праць, присвячених принципам функціонування складних нерівноважних динамічних систем [33]. Порядок із хаосу – так можна визначити формулу самоорганізації. Або більш повно: порядок у синергетиці – це макроскопічна впорядкованість, яка виникає при збереженні (і за рахунок!) мікроскопічної разупорядкованості (хаосу). Таким чином, синергетика вирішує проблему адекватного опису особливостей

взаємодії макро- і мікрорівней систем, що було неможливим у рамках редуccionістського і холістичного підходів до дослідження складних об'єктів. Аналіз історії розвитку самої синергетики дозволяє говорити про процеси самоорганізації, що відбуваються у її середині: із хаосу окремих наукових поглядів, підходів, течій і шкіл у різних сферах знань зароджується новий порядок – синергетична теорія. У саму назву «синергетика» Г. Хакен, окрім основного значення, закладав ще й ідею спільної діяльності вчених різних спеціальностей з пошуку загальних закономірностей еволюції складних систем матеріального світу. Він говорив: «Я шукав таке слово, яке передавало б спільну діяльність, загальну енергію щось зробити... Я переслідував ціль привести в рух нову галузь науки...» [40, с. 53]. Поняття й концепція самоорганізації, які посідають центральне місце в синергетиці, виникли первісно в кібернетичній теорії. Обидва наукових напрямки застосовують схожу термінологію, але їхні підходи і принципи досліджень багато у чому не співпадають [41, 57, 58]. По-перше, кібернетика основну увагу приділяє інформаційним і управлінським процесам, а синергетика розглядає принципи організації, упорядкування і самоускладнення систем. 36 По-друге, кібернетичний підхід розглядає абстрактні кібернетичні системи, незалежно від їхніх конкретних матеріальних форм, тоді як синергетика досліджує фізичні основи формування структур. По-третє, кібернетика досліджує в основному системи вищої організаційної і функціональної складності – живі, соціально організовані й штучно створені людиною, які і розглядаються як такі, що здатні до самоорганізації. Синергетика ж вважає самоорганізацію універсальним явищем, притаманним усім системам, у тому числі і неживій природі. По-четверте, кібернетика і синергетика по-різному трактують поняття «самоорганізація». Це поняття в кібернетиці застосовують до класу систем, що мають антиентропійний характер функціонування, який спрямований на збереження своєї структури і рівноважного стану шляхом активного впливу на оточуюче середовище. Основна роль у підтримці гомеостазу відводиться механізмам зворотного зв'язку. Явище самоорганізації

пов'язується зі стійкістю систем, яка забезпечується інформаційними механізмами самостабілізації. Нерівноважність – це та деструктивна засада, з якою система повинна боротися для збереження своєї стійкості й цілісності. Синергетика, навпаки, бачить в нерівноважному стані джерело виникнення й розвитку впорядкованих структур. Увага акцентується не на підтримці, а на процесах трансформації рівня гомеостазу системи, причому значну роль у явищі самоорганізації відіграють механізми позитивного зворотного зв'язку, тобто самопідсилення. І нарешті, п'яте. Кібернетика і синергетика описують складні еволюційні процеси, використовуючи різні математичні методи – лінійні та нелінійні. Синергетика виходить з уявлень про принципову нелінійність реальних процесів, серед яких є окремі випадки – явища лінійної природи, які традиційна кібернетика вважає загальнопоширеними. Яким же чином синергетика пояснює процеси і механізми самоорганізації? Вивчення й узагальнення широкого кола літературних джерел з філософських, методологічних і спеціальних проблем синергетики [5-7, 9, 12, 33, 34, 38-45, 50, 53-105] дозволяє стисло відповісти на це питання таким чином. Під впливом зовнішнього середовища та (або) внутрішніх змін відкрита система може відхилитися від рівноважного стану. Невеликі відхилення система гасить, використовуючи від'ємні зворотні зв'язки й адаптаційні механізми, і залишається на існуючій траєкторії роз- 37 витку (аттракторі – в термінах синергетики, який означає відносно сталий стан системи, що притягує всю різноманітність її траєкторій); її поведінка є детермінованою і передбачуваною. Але якщо флуктуації стають значними і, багаторазово підсилюючись механізмами позитивного зворотного зв'язку, переходять певне критичне значення, система якісно змінює свій стан: або внаслідок посилення кооперативних процесів виникає нова структура, або система руйнується. Такі критичні моменти в розвитку систем отримали назву «точки біфуркації». Поведінка системи в закритичній області є важкопередбачуваною. Замість попереднього одного сталого шляху еволюції системи виникає декілька (безліч) нових альтернативних шляхів, і в точці

біфуркації система сама випадковим чином обирає один з них. Ось як описують І. Пригожин та І. Стенгерс поведінку системи в точці біфуркації: «Коли система, еволюціонуючи, досягає точки біфуркації, детермінований опис стає непридатним. Флуктуація змушує систему обрати ту гілку, за якою буде відбуватися подальша еволюція системи. Перехід через біфуркацію – такий же випадковий процес, як кидання монети ... Наявність нестійкості можна розглядати як результат флуктуації, яка спочатку була локалізована у малій частині системи, а потім поширилась і привела до нового макроскопічного стану» [33, с. 236-237]. Реакція системи на флуктуації поблизу та в точках біфуркації є високочутливою і має нелінійний характер – невеликий вплив чи випадкова обставина здатна викликати значну зміну поведінки системи (так званий «ефект метелика»). «Значимість точок біфуркації полягає ще і в тому, що тільки в них можливо несиловим, інформаційним способом, тобто скільки завгодно слабкими діями, вплинути на вибір поведінки системи, на її майбутнє» [86, с. 166]. Тобто саме у критичні періоди розвитку можлива організація ефективного управління системою, що самоорганізується. Пройшовши через точку біфуркації і вступивши до поля тяжіння нового аттрактора, система знову переходить до адаптаційних механізмів розвитку. При цьому немов би поєднуються стохастичне і детерміноване бачення в одному, синергетичному, поясненні еволюційних процесів: наявність флуктуацій, численність вибору і непередбачуваність поведінки системи в точці біфуркації змінюється сталим детер- 38 мінованим розвитком між точками біфуркації. Саме адаптаційні і біфуркаційні (катастрофічні, порогові) механізми є двома головними класами еволюційних механізмів, що властиві процесам розвитку будь-яких систем, які самоорганізуються. У джерелі [104] показано, що для виникнення явища самоорганізації необхідне виконання таких умов: величина рушійної сили процесу має бути достатньо великою, щоб система опинилася в області існування біфуркації; об'єм системи має бути достатньо великим і досягати певної критичної величини, яка б забезпечувала необхідну кількість

незатухаючих флуктуацій; взаємодія останніх і створює впорядкованість у системі; залежність узагальненого потоку (маси, теплоти тощо) від рушійної сили процесу має бути нелінійною. Такими є зовнішні прояви процесів самоорганізації. Якими ж є її внутрішні механізми? Оскільки будь-які перетворення потребують від системи витрат енергії, система повинна, по-перше, мати джерела енергії і, по-друге, мати таку внутрішню організацію, щоб накопичувати, закріплювати й перетворювати енергію. Приплив енергії ззовні можливий тільки для відкритих систем. Добуваючи із зовнішнього середовища енергію чи енергонасичені речовини і скидаючи туди відходи своєї діяльності, система таким чином здійснює з ним обмін (метаболізм). Саме відкритість систем і їхній метаболізм формують енергетичний базис процесів розвитку і відіграють значну роль у процесах самоорганізації. Іншою необхідною передумовою є здатність системи підтримувати гомеостаз. Останнє поняття передбачає динамічну відносну стійкість складу і властивостей системи у певному діапазоні параметрів. При незначних відхиленнях параметрів система продовжує функціонувати, зберігаючи рівень гомеостазу, хоча й з можливим зниженням ефективності. При нарощуванні відхилень параметрів система стрибкоподібно переходить на новий рівень гомеостазу – більш низький (аж до руйнування) або більш високий (самоорганізація і саморозвиток) залежно від енергетичної насиченості системи. Розглянемо, яким же чином при цьому відбувається перехід до нового впорядкованого стану системи.

39 Флуктуації, що виникли, намагаються порушити рівновагу і однорідність простору. Якщо зовнішня рушійна сила є незначною або між елементами системи відсутні зв'язки, то окремі випадкові стани системи не справляють суттєвого впливу на її макроскопічну поведінку і нова впорядкованість не формується. При нарощуванні рушійної сили зростає як частота флуктуацій, так і ймовірність їхньої передачі іншим елементам системи. Останні можуть бути притягнутими енергетичним «сплеском», який виник у локальній області простору. Групуєчись навколо цього «острівка самоорганізації», раніше незалежні

елементи системи починають поводитися узгоджено (когерентно) і формують колективну, самопідсилюючу поведінку. Інформацію про колективні властивості системи містять так звані «параметри порядку». Це певні макроскопічні змінні, які підкоряють собі рух мікроелементів і визначають поведінку всієї системи («принцип підпорядкування» Г. Хакена). У монографії [57] обґрунтовується думка, що узгоджена поведінка елементів реалізується у певну загальну «логіку», через яку буде переломлюватися зовнішній вплив і яка буде визначати єдину відповідь системи. Закон функціональної залежності елементів, притаманний будь-якій сукупності узгоджених елементів, може виступати в ролі «організаційного фактора», або регулятора поведінки системи (причому регулятора не локалізованого, а структурно-розсіяного, сумативно-діючого типу). Така точка зору є розвитком тези, яку вперше висунув У. Ешбі, що механізм управління може бути ототожненим із законом, зі стійкою логікою функціонування системи, котра як тип поведінки системи, що повторюється, слідує із «...тієї особливої форми відношення елементів, за якої будь-який з них виступає в ролі корелятора поведінки іншого» (цит. за джерелом [57, с. 15]). Дійсно, в рамках сучасного розуміння природи процесів розвитку треба визнати обмеженою думку про можливість існування керуючого механізму лише у матеріальній формі. В основі функціонування багатьох систем, що самоорганізуються, лежить несилова, інформаційна взаємодія елементів. Тому завдання управління такою системою полягає в інформаційній організації у часі і просторі ефективних зв'язків елементів, пошук «резонансних областей» і цілеспрямований вплив на систему, який узгоджується з її власною поведінкою. 40 Синергетичний аналіз розглядає час як найважливіший параметр функціонування складної системи.