

Динаміка складних систем

Загальні закони динаміки розвитку складних систем



Октавіан Ксенжек
доктор хім. наук,
професор
Українського державного
хіміко-технологічного
університету,
м. Дніпропетровськ

Зі складними системами різної природи, масштабу й значення ми маємо справу постійно. Так само, як і всі живі істоти, ми самі є складними системами. У той же час ми є компонентами складних систем вищого ієрархічного рівня — різних соціальних структур. Поведінка складних систем у більшості випадків є непередбаченою. Іноді складні системи, як, наприклад, ураган Кетрин, викликають багато лих. Інший приклад — нинішня криза світової економіки, яка теж є складною системою. Незважаючи на велику розмаїтість, складні системи зовсім різної природи проявляють очевидну схожість у динаміці свого розвитку.

Що таке "складна система"?

Видається цілком природним, що, перш ніж розглянути якусь проблему, самий об'єкт розгляду має бути визначений досить зрозуміло. Це правильно щодо порівняно простих систем, інтегральні властивості або поведінка яких можуть бути виведені, принаймні теоретично, із властивостей їхніх частин. Однак, як показав Дж. фон Нойман [1], якщо ступінь складності системи зростає, мережа взаємозв'язків між її частинами стає прогресивно щільнішою і заплутанішою, і, нарешті, навіть теоретичний опис такої системи стає складнішим, аніж сама розглядувана система. Така система стає **складною системою** — об'єктом якісно нового рівня, щодо якого навіть задовільного визначення поки ще не існує.

Переважно пропонувані визначення підкреслюють, передусім, що склад-

на система містить великий набір пов'язаних між собою частин, які у сукупності виявляють складну поведінку. Це правильно, але почасти. Існує велика кількість дуже складних пристроїв, конструкцій, машин тощо, складених з безлічі взаємодіючих частин, які, однак, не можна назвати в точному значенні "складними системами", оскільки їхня поведінка є визначеною, і вони нездатні до саморозвитку. Скажімо, сучасний пасажирський авіалайнер — це, звичайно, дуже складний пристрій, але це не "складна система" у розглядуваному сенсі, а просто інструмент, який авіакомпанія використовує для транспортування пасажирів. На відміну від лайнера, авіакомпанія — це справді "складна система", оскільки в неї є свої цілі, курс розвитку, вона має здатність співробітничати й конкурувати з іншими системами такого рівня.

У деяких джерелах [2, 3] можна знайти потішні визначення, наприклад: "Складні системи — це специфічний вид систем, які є складними", або ж "складна система — це така система, пристрій або функція, або те й інше, яку важко зрозуміти й перевірити". Такі псевдовизначення незаперечні, але водночас абсолютно марні. Змістовніше охарактеризував складні системи, наприклад, Брайан Артур [4]: "Складні системи — це системи у процесі, системи, які постійно розвиваються й розгортаються протягом довгого часу."

Мабуть, у принципі неможливо дати адекватне визначення поняттю "складної системи" у рамках механістичної парадигми, хоча більшість спроб має саме такий сенс. Доцільніше було б убачати основний сенс

поняття "складні системи" не в тім, що вони складаються з великої кількості взаємозв'язаних частин, але в тім, що вони є системами спряжених (взаємозв'язаних) процесів. Не число й конфігурація матеріальних компонентів, з яких система складається, але організація й взаємна послідовність процесів, які відбуваються в системі, роблять її складною.

Таку позицію підтверджує факт, що речовинний, матеріальний елемент складних систем не є постійним. Він є рухливим і постійно відновлюється: клітини живих організмів умирають, але заміщаються новими; у суспільстві послідовні покоління змінюють одне одного; у державі уряди йдуть у відставку, їх заступають інші, які приходять, щоб продовжити справу попередників; індустриальна компанія обновлює свої матеріальні ресурси, устаткування, міняє адміністрацію, але продовжує виконувати свої специфічні функції, виробляє автомобілі, або, скажімо, пиво. На відміну від мінливого матеріального компонента складної системи, загальна структура сукупності процесів, що відбуваються в ній, залишається, в основному, інваріантною протягом всього життя системи.

Отже, ми можемо визначити предмет нашого розгляду таким чином:

Складна система — це організований ансамбль безлічі спряжених, взаємозв'язаних процесів, який у цілому розвивається в часі, виявляючи здатність до самозбереження й саморозвитку.

З погляду термодинаміки, складні системи — це відкриті системи, що обмінюються з навколишнім середовищем речовиною й енергією, які існують і функціонують за рахунок енергії, що вони одержують із зовнішніх джерел.

У багатьох випадках складні системи є єдиними неподільними сутностями, які взагалі не можуть бути представлені такими, що складаються із частин. Як приклад, уявіть тропічний ураган. Це надзвичайно велика динамічна структура, що втягує колосальні маси повітря й води й поширюється на сотні миль, але це, безсумнівно, єдине утворення, яке неможливо уявити розділеним на частини.

Приклади складних систем різноманітні як у неживій, так і в живій природі. Можна перелічити серед них торнадо й тропічні циклони, деякі інші метеорологічні явища, живі істоти, включаючи людей, колонії мурах і рої бджіл, різні соціальні структури, держави, економічні системи, виробничі компанії тощо. Справді, серед безлічі різних систем, які становлять інтерес для людей, є дуже багато складних систем. Вони є предметом вивчення в різних галузях природничих наук, математики, суспільних наук. Ці дослідження пов'язані переважно зі складними й довгими обчисленнями, а також зі специфічними труднощами фундаментального характеру, що виникають при моделюванні складних систем. Однак, якщо не входити в деталі, але розглядати тільки самі найзагальніші закономірності розвитку складних систем, то проблема істотно спрощується й стає доступною для раціонального аналізу.

Ієрархія складних систем

Всі наявні складні системи утворюються як результат переплетення безлічі взаємозв'язаних процесів, між якими виникають множинні ланцюги внутрішніх зворотних зв'язків. Завдяки наявності цих зв'язків складні системи набувають здатності пристосовуватися до умов, що змінюються. Ця здатність, однак, не безмежна, й тому реальні складні системи мають кінцеву тривалість життя. При наявності сприятливих умов вони виникають, якийсь час існують, але рано чи пізно закінчують своє існування. Немає жодних "безсмертних" складних систем; всі вони виникають і зникають у свій час.

Неминуча "смертність" складних систем має природне термодинамічне пояснення. Будь-яка складна система — це сукупність взаємозв'язаних процесів. Протікання будь-яких процесів вимагає витрати енергії й супроводжується здійсненням роботи й генерацією ентропії. Більша частина генерованої ентропії залишає систему разом із відпрацьованою енергією, але деяка частина залишається в системі й поступово накопичується. Це призводить до зниження ефективності координації спряжених процесів, деградації системи й, врешті, до завершення її життєвого циклу. У складних системах соціального рівня накопичення ентропії відбувається, зокрема, в інтелектуальній і поведінковій сфері: принципи поступово перетворюються в догми; орієнтація на пошук нового поступається ідеалізації минулого, дуже часто без достатніх на те підстав. Закони, традиції, норми суспільної поведінки поступово відстають від дійсності, що змінюється. В остаточному підсумку стабільність системи і її здатність пристосовуватися до зовнішніх умов і протистояти конкурентам знижується настільки, що система втрачає життєздатність.

Тільки системи найвищого, глобального рівня, які існують в однині й не мають конкурентів на своєму рівні, є винятками. Вони можуть існувати невизначено довго. На Землі є тільки дві системи такого рангу: метеорологічна й біологічна. Перша функціонує, поки на Землі присутні рухливі фази — атмосфера й гідросфера. Друга — це біосфера. Вона з'явилася й почала розвиватися, коли температура поверхні молододі планети достатньо понизилася. Обидві системи приводяться в дію одним і тим самим джерелом енергії — потоком сонячних променів. Обидві системи виявляють взаємний вплив, але не конкурують. Метеорологічна система в цілому формується надзвичайно великомасштабними процесами переносу величезних мас повітря й води. Вона містить у собі системи нижчих рівнів, такі як океанські течії (Гольфстрім, течія Гумбольдта та ін.), регулярні вітри (мусони), циклони, урагани, торнадо, грози, і так далі — вниз по шкалі масштабів. Метеорологічна система не здійснює прямих креативних функцій, але працює як глобальний "двигун", який забезпечує дисипацію сонячної енергії, що падає на Землю, і генерує ентропію.

Біологічна система, навпаки, використовує сонячну енергію для створення високоорганізованих об'єктів зі зниженим рівнем ентропії — різноманітних живих організмів. Ієрархія рівнів біологічних систем починається з окремих живих клітин, які у свою чергу є складними системами, незважаючи на мікроскопічні розміри. Безліч однотипних складних систем нижчих рівнів мають чітко виражену тенденцію поєднуватися в системи вищого рівня складності. Так, одноклітинні бактерії утворюють колонії, бджоли живуть роями, люди формують найрізноманітніші асоціації. Складні системи вищого рівня організації існують набагато довше, ніж системи нижчого рівня, з яких вони утворені. Це досягається в результаті зміни послідовних поколінь систем нижчого рівня.

Складні системи соціального рівня, які для нас, людей, мають особливе значення, у свою чергу є елементами загальної Біологічної системи. Як усі системи не найвищого рівня, вони не безсмертні й, що важливо, розвиваються дуже швидко порівняно з біологічними системами. Природним наслідком швидкого розвитку соціальних систем, що формуються людьми, є відносно невелика тривалість їхніх життєвих циклів. У цьому відношенні вони різко відрізняються від соціальних систем, формованих деякими комахами (терміти, мурах, бджоли), які є дуже давніми й консервативними. Вони існують на Землі вже сотні мільйонів років, практично не змінюючись. Як довго протриває існування соціальних систем, створюваних людьми, ніхто не

знає. В усякому разі, вид *Homo sapiens* і створена ним цивілізація напевно не можуть зрівнятися за очікуваною тривалістю свого існування з видами давнішими й примітивнішими.

Видається доречним внести деяку ясність у питання про життя й смерть складних систем. Оскільки вони, за визначенням, є системами спряжених процесів, вони існують — інакше кажучи, вони живуть — поки тривають ці процеси. Якщо вони зупиняються — з якоїсь причини — припиняється існування системи — вона "умирає". При цьому, однак, припинення існування системи певного рівня зовсім не обов'язково веде до руйнівних або фатальних наслідків для систем нижчого ієрархічного рівня, що входять до неї, так само як і для системи вищого рівня, до складу якої входить система, що " гине". Наприклад, певна країна (складна система) може припинити своє існування в результаті приєднання до більшої сусідньої країни. У кращому разі це може лише незначно вплинути на існування її жителів (теж складні системи, але нижчого рівня), так само, як і на світове людське співтовариство (складна система вищого рівня).

Подібність у розмаїтості

Складні системи, незалежно від їхньої природи, мають деякі загальні риси. Всі вони є відкритими (тобто взаємодіють із середовищем) динамічними системами взаємозв'язаних процесів. Вони формуються й продовжують існувати, поки процеси, що протікають у них, у достатній мірі забезпечують енергією.

Багато складних систем всіякої природи й масштабу, які розвиваються в навколишньому середовищі, в якому інші системи порівнянного масштабу також існують і розвиваються, виявляють дивовижну подібність у динаміці своїх життєвих циклів. Типова **картина циклу життя для різних складних систем** звичайно виглядає, як показано на рис. 1. Цикл починається з невизначено довгого прихованого періоду дуже повільного розвитку, який можна назвати *латентною або прихованою фазою* (lag-phase). Вона змінюється потім *фазою швидкого росту*, яка, у свою чергу, переходить у *клімакс-фазу* — період вищого розквіту системи. Після цього, однак, неминує настає *фінальна фаза розвитку* системи — її деградація й розпад.

При загальній схожості форми кривих розвитку складних систем різної природи, масштаби їхнього розгортання в часі можуть бути дуже різними. Скажімо, тривалість життя торнадо може становити кілька годин, тропічного урагану — кілька тижнів. Грандіозний атмосферний вихор на

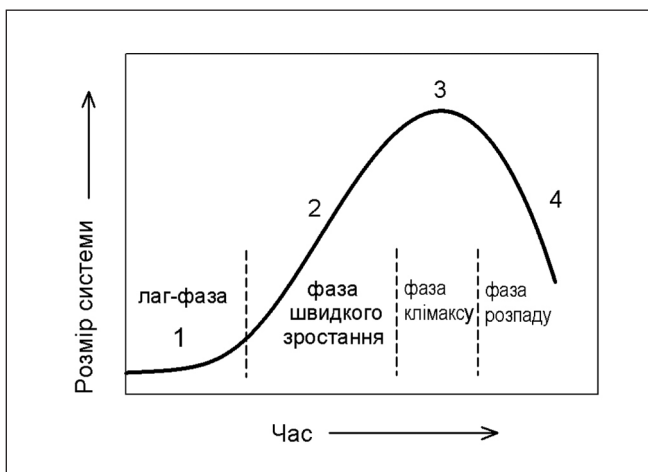


Рис. 1. Типові фази розвитку складних систем

Юпітері, відомий як "Велика Червона Пляма", що за площею в кілька разів перевершує поверхню земної кулі, існує сотні років. Тривалість життєвого циклу біологічних складних систем теж варіює в дуже широких межах. В одноклітинних вона може вимірюватися годинами. Протягом декількох місяців здійснює свій життєвий цикл однолітня рослина; у людини життєвий цикл триває кілька десятиліть. Біологічні види проходять свій життєвий шлях на Землі — від виникнення до зникнення — за мільйони, десятки й навіть сотні мільйонів років.

Визначаючи останню фазу існування системи як стадію розвитку, ми, природно, дозволяємо собі деяку семантичну вільність, оскільки розпад за сенсом ніяк не є розвиток, а скоріше антонім цього слова. Було б точніше говорити про фази циклу життя системи замість фаз її розвитку, але звичне застосування цього слова, напевно, не вводить в оману.

Різні автори використовували різну термінологію для того, щоб визначити фази розвитку різних складних систем. У деяких випадках для цього досить буває подумки розділити весь цикл життя системи на мінімальне число основних фаз, що чимось між собою достатньо помітно відрізняються. Наприклад, життєвий цикл людини розглядають звичайно як послідовність п'яти фаз: дитинство (дві фази), юність, зрілість, старість. Простежуючи розвиток набагато складніших систем величезного масштабу, таких як імперії й цивілізації, *Арнольд Тойнбі* [5] обмежувався тільки трьома фазами, або стадіями: народження, ріст і розпад. *Освальд Шпенглер* [6] розглядав такі ж об'єкти в межах структури із чотирьох фаз, використовуючи для їхнього позначення назви сезонів: весна, літо, осінь, зима. *Лев Гумільов* [7], російський історик-етнолог, ділив життєвий цикл цивілізацій на сім фаз або стадій: інкубаційний період, підйом, акматична фаза (або перегрів), надлом, інерційна фаза, обскурація, агонія. Важко сказати, наскільки дрібніша деталізація циклу життя складної системи сприяє глибшому розумінню її сутності. В остаточному підсумку, незважаючи на розмаїтість способів опису складних систем, усі варіанти відбивають ту саму загальну якісну картину динаміки розвитку складних систем.

Розвиток складних систем у часі полягає у зміні їхніх параметрів, які можна розглядати як якийсь умовний "розмір" системи. Залежно від конкретного типу систем, з поняттям їхнього "розміру" можуть бути зіставлені різні якості. Це може бути, наприклад, маса живої істоти, чисельність популяції певного виду, розмір території держави, чисельність його населення, масштаб економіки, активи промислової компанії, число прихильників певної релігії, наукової ідеї, чисельність членів політичної партії і т.ін. Просторові й часові шкали розвитку складних систем у більшості випадків корелюють: маленькі системи розвиваються й закінчують свій життєвий цикл відносно швидко, великі, як правило, — повільніше.

Зовсім небагато математики

Очевидна схожість у динаміці розвитку складних систем свідчить про те, що незалежно від їхнього масштабу й природи, їхня поведінка підпорядкована якимось загальним закономірностям, зумовленим не матеріалом систем, але самою структурою процесів їхнього розвитку. Це дає підставу для того, щоб спробувати описати процес розвитку математично [8].

Щоб одержати узагальнений математичний опис процесу розвитку складної системи, достатньо, очевидно, зробити деякі прості припущення:

1 Система розвивається (у найзагальнішому сенсі) під впливом якогось "стимулу" (природа якого може бути різною в різних системах).

2 "Сила" стимулу пропорційна відношній швидкості розвитку системи.

3 Прискорення розвитку системи пропорційно силі стимулу.

4 Навколишнє середовище, в якому існує система, що розвивається, чинить опір її розширенню; в міру росту системи, протидія середовища підсилюється.

Ці вихідні постулати можна пояснити на якому-небудь конкретному прикладі складної системи, що розвивається. Це могла б бути, скажімо, індустріальна компанія в початковій стадії розвитку або нова політична партія, або маленька держава, одержима мрією про перетворення в імперію тощо. На самому початку процесу будь-яка така система існує віртуально, фактично як "ембріон", у якого є якийсь шанс реалізувати свої прагнення й стати реальною складною системою, але не має на те жодних гарантій. У відповідному середовищі може виникати безліч подібних ембріонів. Вони в ній якимось співіснують і взаємодіють як із середовищем, так і між собою. Як правило, взаємозв'язки між ними породжують елементи конкуренції за простір, речовину, енергію, вплив. Співіснування такого виду може тривати невизначено довго, не викликаючи суттєвих і довгострокових змін у положенні або стані окремих об'єктів. Однак, внаслідок збігу більш-менш випадкових обставин, якийсь із співіснуючих об'єктів може одного разу одержати значущу перевагу перед іншими подібними йому об'єктами й зуміти нею скористатися. Досягнутий у такий спосіб успіх стає стимулом для того, щоб прагнути до подальших успіхів. Вступає в дію механізм позитивного зворотного зв'язку, й система починає розвиватися, перетворюючись із "ембріона" у складну систему, що розширюється.

Наочніше можна представити, наприклад, таку картину подій. Група членів невеликого племені здійснює набіг на сусідів і повертається зі здобиччю. Такий примітивний і легкий спосіб самозабезпечення, не дуже шляхетний, але зате вигідний, цілком може послужити для одноплемінників стимулом, що спонукує їх приєднатися до участі в новому промислі. Позитивний зворотний зв'язок, що виникає, сприяє росту активної групи й розширенню масштабів її діяльності. З іншого боку, в міру збільшення розмірів активної групи зменшується частка кожного з її учасників при розподілі здобичі. Крім того, збільшується число потенційних конкурентів і ворогів, і зростає опір потенційних жертв. Як наслідок, стимул поступово слабшає.

Видається природним припустити, що "сила" стимулу, що спонукує систему розростатися, повинна бути приблизно пропорційною відношній швидкості її росту. Це можна виразити символічно у такий спосіб:

$$\text{Стимул} = \Delta y / y \cdot \Delta t,$$

де (y) — узагальнений "розмір" системи, (Δy) — приріст (збільшення) розміру, і (Δt) — інтервал часу, за який цей приріст досягається. Якщо за цей час "ефект" діяльності системи, тобто збільшення її розміру, є досить помітним на фоні її вихідного розміру, то сила стимулу велика, а інакше він слабшає, оскільки очікуваний ефект занадто малий і не вартий зусиль.

У простій механічній системі сила, прикладена до об'єкта, змушує його рухатися з прискоренням. Аналогічно, стимул, прикладений до системи, викликає прискорення її розвитку. Наприклад, якщо певна етнічна група або нація відчувають дію досить сильного внутрішнього стимулу, спрямованого на зовнішню експансію, це може привести до прискореного розширення території, яку вона займає. Природно припустити, що прискорення повинне бути пропорційно силі діючого стимулу. Прискорення — це

швидкість збільшення швидкості. У математичному сенсі — це друга похідна розміру системи за часом. Таким чином, замінюючи кінцеві прирости у виразі для стимулу нескінченно малими dy й dt , ми одержуємо наступне диференціальне рівняння:

$$d^2y/dt^2 = a \cdot (dy/y \cdot dt),$$

де a — коефіцієнт пропорційності, що має розмірність швидкості зміни розміру системи.

У цьому вигляді рівняння є неповним. Воно описує розвиток системи при досить нереальній умові відсутності впливу середовища. Оскільки в дійсності навколишнє середовище й конкурентні системи, що перебувають у ній, чинять опір розвитку системи, яку ми розглядаємо, то рівняння варто доповнити членом, що враховує їхню гальмівну дію. У першому наближенні ефект впливу середовища можна прийняти пропорційним розміру зростаючої системи (by) :

$$d^2y/dt^2 = a \cdot (dy/y \cdot dt) - by, \quad (1)$$

де b — коефіцієнт пропорційності, що має розмірність одиниці, поділеної на квадрат масштабу часу.

Загалом кажучи, залежність опору середовища від розмірів зростаючої системи не обов'язково повинна бути лінійною. Вона може бути й стрімкіше зростаючою і млявішою. Це можна врахувати, приймаючи додатковий член у рівнянні (1) пропорційним не першому степеню розміру системи, а, скажемо, квадрату або, відповідно, квадратному кореню розміру. Втім, ці розходження можуть вплинути, головним чином, на третю й четверту фази розвитку, але істотно змінювати загальну поведінку системи вони не можуть. І взагалі, динаміка останньої фази циклу життя складної системи визначається, переважно, не стільки внутрішніми механізмами її розвитку, скільки дією зовнішніх факторів, вплив яких може змінюватися в широких межах.

Аналітичне розв'язання запропонованого рівняння (1) очевидно, невідомо, але використання числових методів дозволяє одержувати його конкретні розв'язання при певних заданих значеннях коефіцієнтів a й b , а також початкових значеннях функції (y) і її похідній у початковій точці (при $t = 0$). Взагалі, розв'язання можуть бути дуже різноманітними, але серед них тільки ті становлять інтерес у зв'язку з проблемою, що розглядається, які задовольняють певним додатковим умовам. Насамперед, сенс мають тільки розв'язання з позитивними значеннями функції (y) . Якщо вони негативні, то це значить, що такої системи просто не може існувати.

За певних умов функція простягається в нескінченність, за деяких інших — іде в нереальну область негативних "розмірів". Однак, у межах досить широкого діапазону параметрів функція виглядає на графіку як горбата крива з більш-менш довгим початковим сегментом. Деякі приклади таких кривих показані на рисунку 2.

Як можна бачити, форма кривих якісно відповідає динаміці розвитку, типової для більшості складних систем, що розвиваються, (див. рис. 1). Початкова ділянка з дуже малим нахилом відповідає латентній (прихованій) фазі розвитку. Наступний сегмент представляє фазу швидкого росту. Далі система вступає в клімакс-фазу - період свого вищого розквіту й відносної стабільності, з тим неминуче настає фінальна фаза розвитку системи — її деградація й розпад. Система перестає існувати.

Форма розрахункових кривих досить чутлива до значень параметрів a й b . Зі збільшенням коефіцієнта (a) розвиток системи прискорюється: скорочується тривалість латентної фази, більших значень досягає максимального розміру системи, скорочується загальна тривалість її існу-

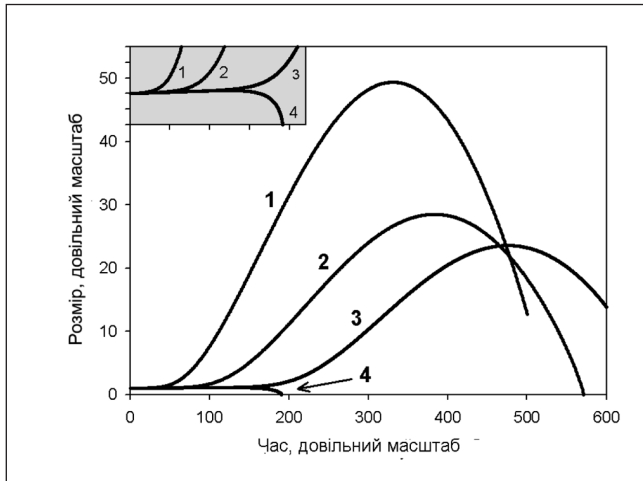


Рис. 2. Розв'язання рівняння (1) при різних значеннях коефіцієнта (а), інші параметри однакові.

У послідовності кривих 1 — 4 величини (а) дорівнюють, відповідно: 0.1, 0.07, 0.0642 й 0.0641.

Сірий прямокутник у лівому верхньому куті — початковий фрагмент діаграми в п'ятикратно збільшеному по осі Y масштабі

вання. Збільшення коефіцієнта (b) приводить до зменшення максимального розміру системи й скороченню її загального строку життя. При занадто "жорсткій" реакції середовища (велике значення коефіцієнта (b)), система взагалі може не ввійти у фазу швидкого росту, але припинити своє існування на "ембріональній" стадії.

Суттєво, що для того, щоб повний життєвий цикл системи взагалі міг реалізуватися, початкова величина похідної функції (y) (при $t = 0$) не повинна бути занадто малою, інакше усе закінчується латентною фазою.

Наше рівняння (1) виявляє дуже цікаву особливість, що має фундаментальне значення. Загальна форма кривих, описувана рівнянням, залишається подібною в межах досить широкого діапазону параметрів. Є, однак, критична область значень параметра (а) за інших рівних умов, поза межами якої динаміка системи різко змінюється. Криві 3 й 4 на наведеному вище рисунку демонструють такий випадок. Для обох кривих усі параметри однакові, крім величини коефіцієнта (а), який для кривої 4 усього лише приблизно на одну тисячну менше, ніж для кривої 3. Незважаючи на таку мізерно малу різницю у величині коефіцієнта, цього виявляється достатнім, щоб радикально змінити долю системи. У випадку кривої 3 "ембріон" успішно переходить із латентної фази у фазу швидкого росту й перетворюється в реальну складну систему, тоді як у випадку кривої 4 він безславно закінчує свої дні, не виходячи зі стану "немовляти". Таким чином, точка переходу з латентної фази у фазу швидкого росту може бути критичною в долі системи.

Надзвичайно висока чутливість поведінки складних систем до величин параметрів розвитку дає підставу припускати, що минуле Землі, її біосфери й людської історії повне віртуальних складних систем, які мали якийсь шанс розвинутися повною мірою, але не змогли його реалізувати із-за якихось, можливо, навіть не дуже істотних обставин. Це стосується систем всілякої природи, від тропічних циклонів, які не розвинулися до масштабів тайфуну, до імперій, що не відбулися, або геніїв науки чи мистецтва, що не реалізували свої потенції. Вони зникли без сліду не тільки з дійсності, але й з пам'яті людей теж.

Поведінка рішень рівняння (1) може становити певний інтерес із абстрактної теоретичної точки зору. Справді, це рівняння демонструє можливість досить незвичайного яви-

ща, яке можна назвати "відстроченим роздвоєнням" або "відстроченою біфуркацією". Дві складні системи, що починають свій розвиток від дуже близького початкового стану, можуть тривалий час розвиватися практично нерозрізненими шляхами, але їхня подальша доля може виявитися зовсім різною через гранично малі початкові розходження або незначні зовнішні впливи на початковій ділянці розвитку.

Імпульс, дія, результат

Відтворення життєвого циклу складної системи починається з невідчутних, зовні майже невидимих процесів. Якщо розглядати соціальні системи, то початкові процеси їхнього розвитку в латентній фазі відбуваються, головним чином, на рівні свідомості, почуттів, емоцій, тобто, загалом кажучи, в інформаційній сфері. Коли ці процеси стають скільки-небудь синхронізованими й входять у резонанс, вони стають імпульсом, що стимулює спрямовану активність у матеріальній сфері. Ці дії стають відчутними — їх відчуває як система, що розвивається, так і середовище, у якому вона існує. Результат цієї активності, який накопичується, виявляється у збільшенні розміру системи. Спочатку ріст системи відбувається з прискоренням, але в міру того, як система збільшується, відносна швидкість росту знижується, а разом з тим зменшується й сила спонукаючого стимулу. З ослабленням стимулу загасає й породжена ним активність. Система переходить із фази активного росту в нову фазу, де її подальший шлях визначається інерцією накопиченої нею "маси" і протидією навколишнього середовища й конкурентних систем. Ця природна послідовність подій показана нижче на рисунку 3.

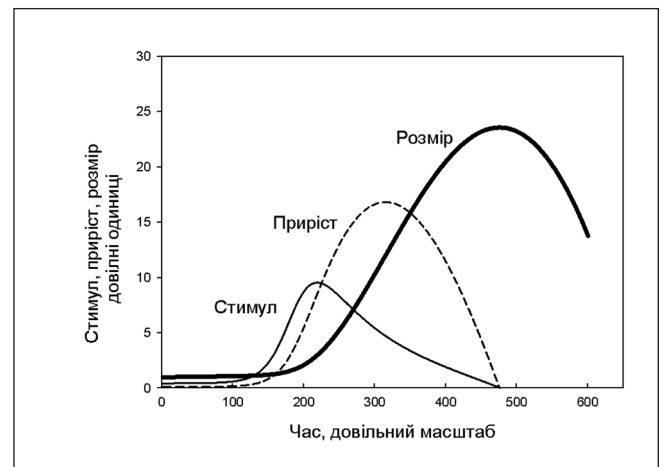


Рис. 3 Фактори, що визначають розвиток складної системи й етапи її просування через послідовність фаз.

Як можна бачити, стимул зростає спочатку, у латентній фазі розвитку, дуже повільно, але з першими успіхами системи в одержанні якогось "приросту", сила стимулу швидко наростає й незабаром досягає максимуму. Реальний "успіх" системи, що виражається у збільшенні її розміру, розвивається зі значною затримкою і досягає свого максимуму, коли сила стимулу вже помітно знижується. Все це відбувається в другій фазі розвитку — фазі швидкого росту. Кульмінаційного моменту свого розвитку система досягає ще пізніше, у фазі клімаксу, але до цього моменту знижуються практично до нуля й стимул розвитку, і темпи приросту. Слідом за цим система переходить у завершальну фазу свого існування, динаміка якої визначається вже не стільки

внутрішніми факторами, скільки зовнішніми, залежними від реакції середовища й активності конкурентів. Залежно від інтенсивності цих факторів фаза розпаду може протікати швидко або ж розтягуватися на порівняно довгий термін.

Головні закономірності, описувані рівнянням (1), є логічно послідовними. Вони відображають дію механізму зворотного зв'язку. У початковій, латентній фазі розвитку цей механізм фактично не працює. З появою перших помітних успіхів системи включається механізм позитивного зворотного зв'язку, що викликає прискорений розвиток системи (фаза швидкого росту). На вершині розвитку (у фазі клімаксу) механізм зворотного зв'язку змінює свій знак з позитивного на негативний. Із цього моменту він діє вже як фактор, що прискорює розпад системи.

Деякі приклади

Можна навести масу ілюстрацій того, як системи різної природи й масштабу демонструють якісно дуже схожий хід розвитку. Наприклад, на рисунку 4 показано, як відбувалася територіальна експансія Римської імперії, починаючи від її республіканської передісторії й закінчуючи розпадом. Точки на діаграмі відповідають історичним даним про розмір територій, що входили до складу Імперії в різні періоди її існування. Крива обчислена за рівнянням (1). Незважаючи на деякий розкид точок, загальний хід кривої описує фактичну динаміку розвитку давнього Риму досить добре. Відповідність здається навіть несподівано доброю, оскільки крива розрахована в припущенні про сталість параметрів, що характеризують діяльність системи (*a*) й опір навколишнього середовища (*b*), хоча насправді вони напевно чи залишалися незмінними протягом сторіч римської історії.

Таку ж динаміку, але з іншими масштабами часу й території, демонструють також багато інших імперій минулого. Можна згадати в цьому зв'язку навіть порівняно недавню історію недовгого "Тисячолітнього" Третього Рейху, який пройшов усі стадії розвитку від прихованої фази до драматичного кінця майже в п'ятдесят разів швидше, ніж Рим — приблизно за 20 років.

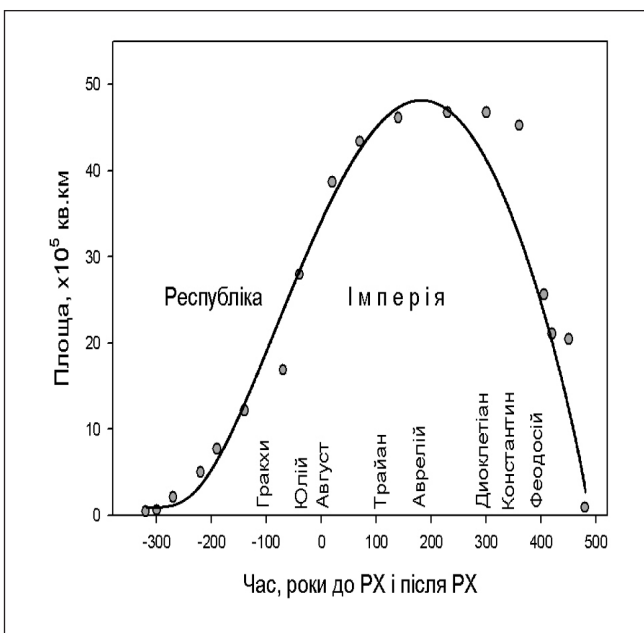


Рис. 4 Динаміка територіального розвитку Римської імперії. Джерела фактичних даних (сірі точки) — [9, 10]

Іншим прикладом розвитку великомасштабної складної системи може бути життєвий цикл комунізму в Європі. Його латентна фаза протривала майже всю другу половину дев'ятнадцятого сторіччя, головним чином як соціальна ідея й політичний рух. На початку наступного, двадцятого, сторіччя воно переросло в Росії у фазу швидкого росту. У результаті Жовтневого перевороту 1917 року комунізм став основою державної системи Радянського Союзу й у цьому статусі виявив виражену тенденцію до активної експансії в ідеологічній, політичній і військовій сферах. Зрештою, коли ресурси й можливості розширення були вичерпані, радянська комуністична система пройшла свій кульмінаційний пункт розвитку й незабаром, у самому кінці ХХ-го сторіччя, зруйнувалася.

Приклад порівняно короткоіснуючої складної системи, цього разу стосовної головним чином до сфери світової економіки, представляє недавня історія буму навколо ідеї "Sustainable development" (Стійкого розвитку). Ця ідея, досить спокуслива, але на безпристрасний науковий погляд, зовсім неспроможна, виникла в шістдесяті роки минулого сторіччя, перейшла у фазу швидкого організаційного розвитку на початку дев'яностих і досягла свого апогею у Всесвітньому Саміті на найвищому рівні в Йоганнесбурзі в 2002 році. На нього з'їхалося близько 30 тисяч учасників, у тому числі більше 50 глав держав і урядів. Однак завершився грандіозний саміт повним фіаско, настільки глибоким, що про цей захід намагаються не згадувати. Нижче, на рисунку 5, символічно показана динаміка наростання ажіотажу, пов'язаного з ідеєю Стійкого розвитку. Як видно з рисунка, і в цьому разі загальний хід подій відбувається за схемою, що характерна й для розвитку інших складних систем.

Можна множити такі приклади поведінки складних систем різної природи — від метеорологічних або біологічних до соціальних, економічних та інших. Загальний характер динаміки розвитку більшості таких систем у якісному відношенні демонструє очевидну подібність, хоча за своїми масштабами — часовим і просторовим — вони можуть дуже сильно відрізнятися.

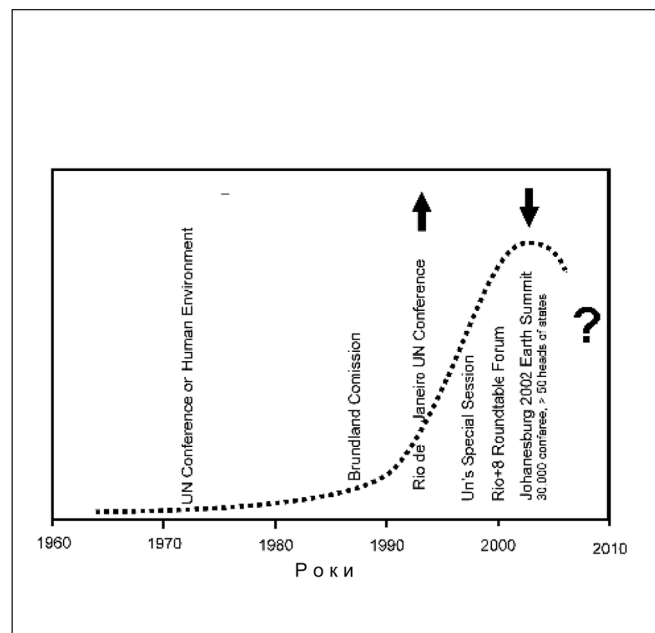
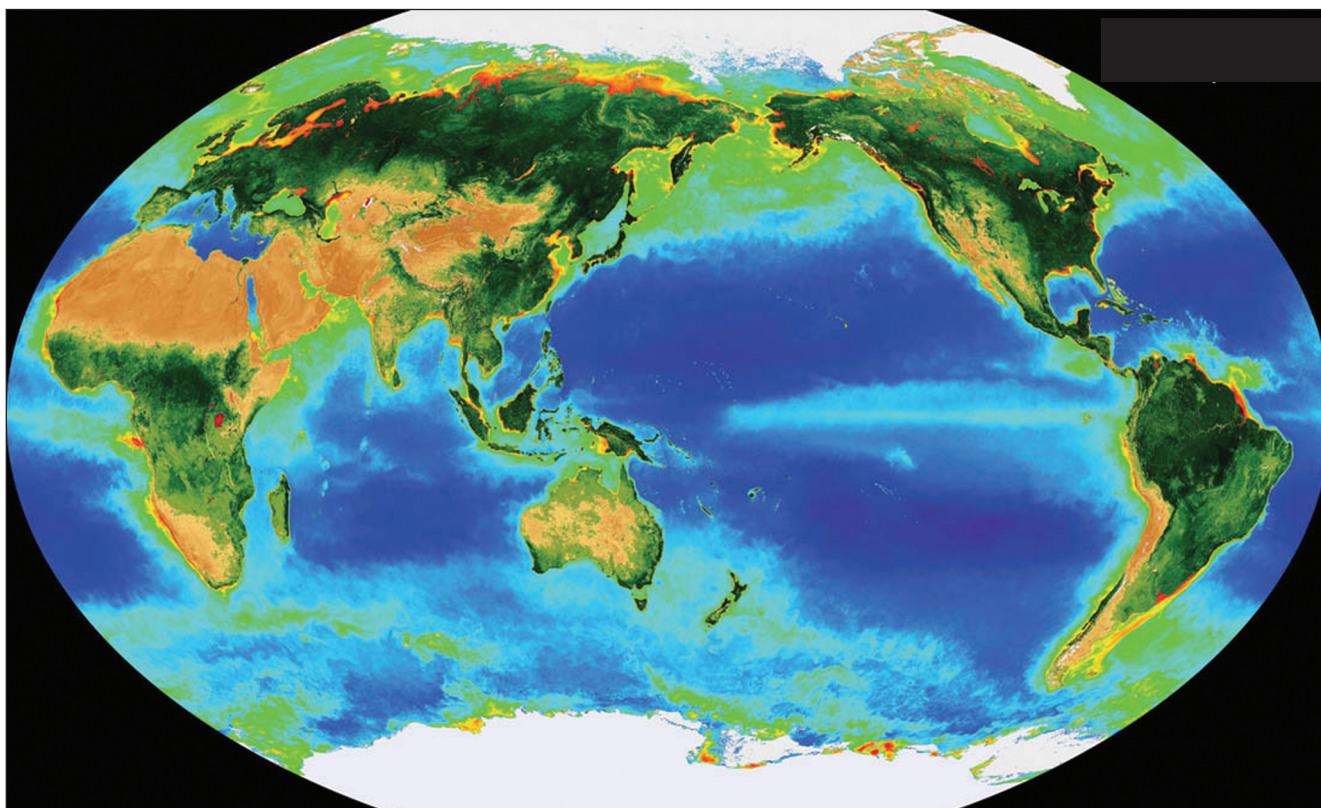


Рис. 5 Фази організаційної діяльності навколо ідеї "Стійкого розвитку"



Биосфера. "Achi Expo", Япония, 2004

http://kelsocartography.com/print/maproom/images/biosphere_FINAL.jpg

Деякі особливості соціальних складних систем

Складні системи, що існують на рівні людського суспільства, можуть виявляти деякі специфічні особливості, тому що їхній "матеріал, що розвивається," (люди), має довгострокову пам'ять, яка може впливати на динаміку розвитку. Системи біологічної або будь-якої іншої природи, крім соціальних, на піку свого життєвого циклу втрачають енергію розвитку й більш-менш плавно й природно входять у термінальну фазу. На відміну від цього, у великих соціальних системах, таких, наприклад, як імперії, факт проходження через вершину часто не усвідомлюється вчасно. Ніхто не бажає вірити, що положення на вершині пагорба, коли усе навкруги здається настільки прекрасним, є водночас несталим, — усі шляхи з вершини ведуть не назад, у звичне минуле, а вниз — у невідоме майбутнє. У фазі клімаксу неминуче змінюється ідеологічна орієнтація суспільства: ідея розвитку поступово замінюється ідеєю збереження. У фазі занепаду старі соціальні цінності, ефективні раніше, у латентній фазі, а потім у фазі швидкого росту, у значній мірі втрачають свій первісний сенс. Суспільство судорожно шукає заміну загубленого стимулу у власних спогадах про колишні успіхи й утішає себе ілюзією можливості відновлення колишнього процвітання й величі. При особливо сприятливих умовах такі зусилля можуть на якийсь час розтягти фазу занепаду, але ні в якому разі не можуть повернути минуле.

Складні системи соціального рівня, так само як і всякі інші, є системами спряжених процесів. Припинення спільного й взаємопов'язаного функціонування цих процесів означає кінець циклу життя системи, але це зовсім не обов'язково сполучено з фізичною загибеллю її матеріального компонента — людей. Більшість із них виявляються пізніше залученими у життєвий цикл нової системи, що формується на зміну попередньої. Такі перетворення рідко відбуваються зовсім без втрат, але в більшості випадків вони

виявляються не катастрофічними. Ембріони нової системи виникають, як правило, коли існуюча система вичерпує свої ідеологічні й психологічні ресурси й входить у фазу занепаду. Подальший хід подій відбувається як суперпозиція різних фаз двох систем — термінальної фази старої системи й початкової фази нової системи. Тут визначення "старий" і "новий" вказують лише на послідовність систем у часі й жодною мірою не характеризують їх з якоїсь іншої позиції.

Іноді заміна однієї системи іншою відбувається дуже повільно, розтягується на кілька поколінь, і тому залишається неусвідомленою аж до завершення процесу, як те відбувалося, наприклад, у Європі при переході від феодалізму до капіталізму. В інших випадках події розвиваються швидко й драматично, супроводжуючись великою кількістю жертв, як, наприклад, так звана "Велика Жовтнева Революція" 1917 року в Росії.

Процеси, що приводять до заміни соціальної системи, яка вже пододала вершину свого розвитку, новою системою, що непомітно росте в тілі старої системи, у більшості випадків не усвідомлюються в їхній справжній сутності. Вони довгий час сприймаються як якась "хвороба" існуючої системи, що вимагає лікування. Усвідомлення дійсності звичайно приходить, коли вже нічого не можна зробити. Винятки іноді трапляються, але в остаточному підсумку вони лише підтверджують закономірність. Так, наприкінці дев'ятнадцятого сторіччя молодий американський капіталізм, що швидко розвивався, відчув наростаючу небезпеку надмірного накопичення капіталів і спробував загальмувати цей процес законодавчими мірами (Антитрестовий Акт Шермана, 1890 р.). Ці міри виявилися, однак, недовговічними. Протидіючі кроки були зроблені незабаром [12], і вже через півстоліття почали приносити плоди, які виявилися дуже привабливими, але отруйними.

В останні 30-40 років заміна традиційної системи індустріального капіталізму новою системою, що звичайно

називають фінансовим капіталізмом, відбувається в загрозовому темпі. Загальне слово "капіталізм" породжує ілюзію, начебто ми маємо справу просто із черговою фазою розвитку все тієї ж традиційної капіталістичної системи. Це, однак, є небезпечною оманною. Ще років десять тому *Джордж Сорос* писав: "Ідеологія "фундаменталізму ринку", віра, що кожен аспект громадського життя найкраще організований відповідно до економічного принципу ринку, замінила громадянський дух і дискредитувала колективне ухвалення рішення" [13]. Фактично, ми зараз є свідками й пасивними учасниками фундаментальних змін людського суспільства, які відбуваються на наших очах. Дуже велика і дуже складна система, що зростає на принципах Протестантизму і принесла небачене раніше процвітання в США, так само, як у багатьох інших країнах, віддає свою споконвічну "територію" зовсім іншій системі. Генетично ця нова система пов'язана зі звичайним капіталізмом, але її ідеологічне обґрунтування є зовсім іншим. Воно скоріше нагадує про лихварство, але в незмінно розвиненіших формах і незрівнянно більших масштабах, ніж у Середньовіччі [14 – 16].

Нещодавні драматичні події у світовій економіці — раптове виникнення непередбаченої глобальної кризи й фактична безпорадність світового співтовариства в зусиллях його подолання, все це зовсім не тимчасова хвороба капіталізму. Це прояв хворобливих ефектів, що супроводжують перехід від нещодавно ще домінуючої у світі соціально-економічної системи до нової системи глобального фінансового панування над світом.

Втім, тут ми явно виходимо за намічені рамки цієї публікації, присвяченої динаміці окремих складних систем, і тому треба зупинитися, відклавши на майбутнє питання про взаємодію таких систем.



Еллен Уокелам. "Стале керування біосфери".

http://4.bp.blogspot.com/_uxOvy65sktY/TSRN84CqyUI/AAAAAAAAAE4/1Ow0xIjMvIo/s1600/biosphere_centre_500_11578.jpg

Література

1. Neumann John Von, Burks Arthur Walter. Theory of self-reproducing automata University of Illinois Press, 1966, 388 pp
2. Wikipedia, Complex system http://en.wikipedia.org/wiki/Complex_system
3. Wikipedia, Complex systems http://en.wikipedia.org/wiki/Complex_systems
4. Brian Arthur. Complexity and the Economy, Science, 2 April 1999. — 284. — p. 107-109.
5. Toynbee Arnold, Somervell David Churchill. A Study of History, Volume 1. — Oxford University Press US. — 1987. — 640 p.
6. Spengler Oswald. Civilization model. — Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Spengler's_civilization_model
7. Gumilev Lev. Ethnogenesis and the biosphere. Moscow, Progress, 1990. — 386 p. English transl. abr. <http://gumilevica.kulichki.net/English/ebe.htm>
8. Ksenzhek Octavian. Money: Virtual Energy; Economy through the Prism of Thermodynamics. — Universal Publishers, 2007. — 211 p.
9. Money is Energy. Knol by Octavian Ksenzhek <http://knol.google.com/k/octavian-ksenzhek/money-is-energy>
10. Roman Empire http://en.wikipedia.org/wiki/Roman_Empire
11. Roman Empire (maps) http://simple.wikipedia.org/wiki/File:Roman_Republic_Empire_map.gif
12. Griffin Edward. The Creature from Jekyll Island: A Second Look at the Federal Reserve. — American Media, 2002. — 608 p.
13. Soros George. The Crisis of Global Capitalism. — Public Affairs, 1998. — 288 p.
14. Algorithm of Life, Knol by Octavian Ksenzhek, <http://knol.google.com/k/octavian-ksenzhek/algorithm-of-life>
15. Phillips Kevin. American Theocracy: The Peril and Politics of Radical Religion, Oil, and Borrowed Money in the 21st Century. — Viking Adult, 2006. — 462 p.
16. Callinicos Alex. Bonfire of Illusions. The Twin Crises of the Liberal World. — John Wiley & Sons, 2010. — 144 pp.