

## ЗАГАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ

---

**Abstract:** Model of evolution is proposed that considers the existence of a deterministic system in environment as relaxation process, which corresponds to the markov model of stochastically dynamic system. Accumulation of the infinitesimal operator values is realized as encapsulation and replication of genotype, formation of macrosystem and inner informational system. This model describes the evolution from appearance of living cell, nervous system, and intellect to arising of civilization, material and spiritual culture.

**Key words:** evolution, system, model, genotype, population.

**Анотація:** Запропоновано модель розвитку, що розглядає існування детермінованої системи в оточуючому середовищі як релаксацію, яка відповідає марковській моделі стохастичної динамічної системи. Накопичення значень інфінітезимального оператора здійснюється як інкапсуляція та реплікація генотипу, утворення макросистем та формування інформаційного внутрішнього середовища. Модель пояснює процес еволюції від появи живої клітини, нервової системи, інтелекту до виникнення цивілізації, матеріальної та духовної культури.

**Ключові слова:** розвиток, система, модель, генотип, популяція.

**Аннотация:** Предложена модель развития, рассматривающая существование детерминированной системы в окружающей среде как релаксацию, отвечающую марковской модели стохастической динамической системы. Накопление значений инфинитезимального оператора осуществляется путем инкапсуляции и репликации генотипа, образования макросистем, формирования внутренней информационной среды. Модель объясняет эволюцию от появления живой клетки, нервной системы, интеллекта до возникновения цивилизации, духовной и материальной культуры.

**Ключевые слова:** развитие, система, модель, генотип, популяция.

### 1. Вступ

Поняття розвитку може відноситись як до матеріальних, так і до нематеріальних об'єктів. Кажучи про розвиток рослини, урагану або теорії, мають на увазі різні речі. В першому випадку це матеріальний об'єкт, у другому – процес, а в останньому – поняття, що існує у свідомості. В кожному випадку йдеться про зміни, за якими сутність об'єкта зберігається. Такі об'єкти, незалежно від їхньої природи, можна розглядати як динамічні системи. Звичайно динамічні системи є стаціонарними в тому сенсі, що спостережувані зміни не є незворотними. Поняття розвитку асоціюється з незворотними змінами, які стають помітними лише при тривалому спостереженні динамічної системи. Такі зміни можуть бути зумовлені наявністю повільних компонент стану системи, які можливо врахувати формально. Причиною змін поведінки також може бути адаптація до зовнішніх чинників, які не завжди можна формально визначити. В останньому випадку систему вважають відкритою, а адаптацію представляють моделлю цілеспрямованої поведінки, що включає заздалегідь визначену ціль та критерій її досягнення [1, 2]. Засоби керування станом такої системи діють за формальними правилами відповідно до обраного критерію. Існує також безліч прикладів природних та штучно створених систем, для яких неможливо окреслити ні мету поведінки, ні критерій її досягнення. Сенсом існування таких систем є виживання, тобто збереження самих себе в реальних умовах оточення. Зміни, що з ними відбуваються на тривалому відтинку часу, є незворотними, і саме такі зміни пов'язані з процесами розвитку. Найбільш характерним прикладом розвитку є еволюція живої природи. Можна також навести приклади комп'ютерних програм штучного життя, які моделюють еволюційний процес, генетичні алгоритми пошуку рішень, методи навчання нейронних мереж [3, 4].

Процес розвитку здійснюється як пошук найбільш ефективних варіантів поведінки системи та її пристосування до умов зовнішнього середовища. Пошук може відбуватись як реальний процес природного добору (загибель-розмноження в живій природі) або як віртуальний процес перевірки варіантів поведінки на моделі оточення, яка сформувалась у процесі розвитку даної системи. Такі пошукові процеси є прихованими, тому зовнішня поведінка (співвідношення між входом та виходом) виглядає як реалізація стохастичного процесу, статистичні характеристики якого з часом змінюються.

Нестационарність спостережуваних параметрів поведінки ускладнює формальне визначення системи, що розвивається. Існуюча практика застосування терміну “відкрита система”, тобто система з невизначеним станом, не є продуктивною і не наближує до розуміння суті процесу розвитку. В даній роботі ми пропонуємо іншу модель процесу розвитку, за якою поведінка детермінованої системи в довільному середовищі є процесом релаксації. Її пристосування до умов середовища відбувається шляхом інкапсуляції, тобто формування специфічного локального оточення та реплікації (розмноження). Реплікація забезпечує збереження генотипу, тобто функціональних ознак системи, які зберігаються незмінними у процесі розвитку. Вона приводить до формування макросистеми, внутрішнє середовище якої створює умови для комунікації, спеціалізації та координації поведінки складових систем. Подальший розвиток макросистем, їх інкапсуляції та реплікації ведуть до формування екосистем та високоорганізованих організмів, появи нервової системи, виникнення інтелекту та розвитку цивілізації.

Пропонована модель дозволяє по-новому інтерпретувати спостережувані процеси розвитку живої та неживої природі, суспільства, економіки, науки. Попередню версію цієї моделі було опубліковано в [5], де за її допомогою одержано інтерпретацію процесів науково-технічного розвитку, зокрема, пов'язаних з наслідками інформаційного вибуху.

## 2. Динамічна система та зовнішнє середовище

У загальній теорії систем [6] динамічну систему визначають як багатомісне відношення на множині пар  $\{X_t, Y_t\}$ ,  $X_t \in \Xi$ ,  $Y_t \in \mathbb{H}$ ,  $t \in T$ , де  $X_t$  та  $Y_t$  - поточні значення вхідного та вихідного об'єктів системи;  $T$  – лінійно впорядкована множина моментів часу. Завдяки впорядкованості часу, це відношення може бути представлене послідовністю тримісних відношень  $\{X_t, Y_t, A_t\}$ , де  $A_t \in \mathfrak{X}$  – поточний стан динамічної системи. Значення входу  $X_t$  та виходу  $Y_t$  характеризують спостережувану поведінку системи в момент  $t$ . Таке визначення відповідає моделі „чорної скрині”, за якою спостережуваними є лише значення входу та виходу, а стан системи є прихованою характеристикою, яка враховує попередню її поведінку.

Функціональне визначення поведінки динамічної системи включає два співвідношення:

$$Y_t = F(X_t, A_t); \quad (1)$$

$$A_t = \Phi(A_{t-\tau}, X_{t-\tau}^t), \quad (2)$$

перше з яких називають рівнянням вхід/вихід, а друге – рівнянням стану системи. Величина  $X_{t-\tau}^t \in R^{n \times T}$  є реалізацією  $n$ - вимірного вектора  $X_t$  на інтервалі спостереження  $(t - \tau, t)$ . Множина

станів  $A_t \in \mathfrak{X} \subset R^{n \times T}$  віддзеркалює попередню поведінку системи. Величина  $|\mathfrak{X}|$  характеризує ступінь складності динамічної системи.

Рівняння (1), (2) не враховують наявність оточуючого середовища, яке також можна розглядати як динамічну систему з протилежним розташуванням входу та виходу та з власним станом  $B_t \in \mathfrak{X}$ . Вважатимемо, що  $|\mathfrak{X}| \gg |\mathfrak{X}|$ , тобто система має суттєво меншу складність ніж її оточення. Рівняння вхід/вихід зовнішньої системи є оберненим до (1):

$$X_t = F^*(Y_t, B_t). \quad (3)$$

Підставляючи це значення входу в формулу (1), одержимо співвідношення, що визначає умови узгодження поведінки системи та її оточення:

$$Y_t = F[F^*(Y_t, B_t), A_t]. \quad (4)$$

Ці умови можуть бути задоволені лише при еквівалентності множин  $|\mathfrak{X}| \equiv |\mathfrak{X}|$ . Виконання цих умов часто неможливо перевірити, тому припускається, що зовнішнє середовище є відкритою системою, стан якої невизначений. Таке припущення дозволяє існування будь-якої функціональної системи, але разом з цим передбачає повне підпорядкування поведінки зовнішнього середовища даній системі, а відтак виключає можливість появи змін у функціональних відношеннях (1,2), які у процесі розвитку є неминучими.

### 3. Релаксаційна модель поведінки

При відмові від припущення про відкритість зовнішньої системи виконання умов узгодженості (4) залежатиме від тривалості співіснування системи та її оточення. Нехай у момент часу  $t^*$  ці умови виконано. Розглянемо поведінку системи (1,2) в наступні моменти часу. Якщо функції  $F(\tilde{O}_t, A_t)$  та  $F^*(Y_t, B_t)$  є безперервними в околі точки  $t^*$ , то існує скінчений інтервал  $T$ , в межах якого різниця  $\varepsilon$  між значеннями правої та лівої частин формули (4) також є малою величиною. Вважатимемо, що умови (4) виконуються доки  $\varepsilon < \delta$ , де  $\delta$  – скінчена мала величина. Якщо в момент  $t^* + T$  цю нерівність порушено, то для продовження свого існування система має перейти в інший стан, для якого умови (4) виконуються. Існує  $(|\mathfrak{X}| - 1)$  альтернативних напрямків переходу, серед яких, можливо, є такі, що для них ці умови виконуються. Вибір напрямку зміни стану не є простим, оскільки зміна внутрішнього стану системи веде до спостережуваної ззовні зміни її виходу, а відтак – зміни стану оточення та його реакції на вході системи.

Таким чином, взаємодія детермінованої системи з її оточенням є релаксаційним процесом, що полягає у зміні стану системи, коли розбіжності між спостережуваними та очікуваними значеннями параметрів поведінки досягають певного критичного рівня. Процес релаксації включає приховану (латентну) стадію накопичення змін та квантовий перехід в новий стан, який розпочинає наступну латентну стадію. Особливою формою релаксації є реплікація – поділ системи на кілька екземплярів такої ж системи. В момент релаксації відбуваються спостережувані ззовні зміни виходу системи або, у випадку реплікації, з'являються нові екземпляри такої системи.

Релаксаційний перехід системи в новий стан веде до спостережуваної ззовні зміни її виходу, наслідком чого стає зміна стану оточення та його реакції на вході самої системи. Ці зміни відбуваються поза системою, і їх наслідки система може лише прогнозувати, користуючись досвідом свого попереднього існування. Накопичення такого досвіду та побудова на його основі ефективної стратегії виживання виходить за межі функцій системи, заданої рівняннями (1), (2). Ці функції має виконувати зовнішнє середовище, принаймні найближче оточення самої системи, яке має контролювати виконання умов узгодженості (4). Детерміновані системи, для яких ці умови завжди виконуються, належать до фундаментальних. Такими є стабільні елементарні частки, оточуюче середовище для яких має форму відповідного фізичного поля. Для решти детермінованих систем час існування обмежений і його продовження можливе лише шляхом релаксації або реплікації, тобто утворення нових копій системи.

Релаксаційний перехід може відбуватись як у часі, так і у просторі. Розглядатимемо межу між системою та її оточенням як умовну, яку можна зміщувати в той чи інший бік, тобто приєднувати до системи елементи її оточення, або, навпаки, віддавати оточенню елементи, що раніше належали системі. Таке переміщення межі еквівалентне зміні стану системи, значень її входу та виходу. Якщо виконано умови безперервності, тобто малі переміщення умовної межі приводять до малих змін спостережуваних на ній величин, то, можливо, що накопичувана в часі різниця  $\mathcal{E}$  між значеннями правої та лівої частин формули (4) може бути компенсована відповідним переміщенням межі між системою та її оточенням. У цьому разі переміщення умовної межі може розглядатись як просторовий еквівалент релаксації в часі. Зрозуміло, що виконання цих умов не завжди можливе, але і процеси розвитку, які ми розглядатимемо, є теж унікальними.

Умовна межа, що проходить поза системою, поділяє зовнішнє середовище на локальне та дальнє оточення системи. Локальне оточення можна розглядати як капсулу, що є відкритою системою, яка забезпечує компенсацію невідповідності детермінованої поведінки динамічної системи поведінці її зовнішнього оточення. Компенсація може здійснюватись шляхом переміщення зовнішньої межі капсули у просторі та релаксаційної зміни стану в часі. Відзначимо, що здатність детермінованої системи до інкапсуляції в оточуючому її середовищі повинна бути запрограмована через властивості функцій (1), (2). Реплікацію детермінованої системи можна розглядати як продовження процесу її інкапсуляції, коли в межах капсули створюються умови, за яких відбувається формування дублікатів детермінованої системи.

Явище інкапсуляції відповідає процесам обміну речовинами та руху в просторі-часі. Аналоги утворення капсули можна бачити в будові живої клітини, де ядро клітини (детермінована система) оточено плазмою, яка виконує буферні функції. Вірогідно, що подібні функції виконують зовнішні електронні орбіти атомів та молекул.

#### 4. Стохастична динамічна система

Релаксаційну модель поведінки можна розглядати як реалізацію стохастичного процесу, що описує множину екземплярів функціональної системи (1), (2) на послідовності інтервалів  $\tau_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$ . Тривалість інтервалу та початковий стан екземпляра системи є випадковими величинами, статистичний розподіл яких залежить від значення  $X_i$ .

Для формального визначення поведінки таких систем введемо поняття стохастичної динамічної системи (СДС), яку будемо розглядати як статистичну модель популяції, членами (індивідами) якої можуть бути детерміновані системи або більш прості СДС. Називатимемо їх елементарними (ЕС). Поведінку індивіда визначає генотип ЕС – незалежна від часу умовна імовірність  $\Delta(Y/X, A)$ , де  $Y, X$  – значення виходу та входу, а  $A \in \mathfrak{S}$  – стан індивіда. Якщо індивідами є детерміновані системи, то генотип ЕС може бути представлений через дельта-функцію:

$$\Delta(Y/X, A) = \delta(Y - F(X, A)).$$

Стохастичні рівняння вхід/вихід та стану СДС мають вигляд [7]

$$P_t(Y/X) = P_t(A)\Delta(Y/X, A); \quad (5)$$

$$P_t(A) = P_{t-\tau}(A)Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^t), \quad (6)$$

де  $P_t(A)$ ,  $A \in \mathfrak{S}$  – вектор розподілу імовірностей стану індивідів популяції в момент  $t$ ;

$Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^t)$  – стохастичний оператор марковського процесу, що визначає перерозподіл індивідів при надходженні реалізації  $X_{t-\tau}^t$ .

Для СДС поняття стану асоціюється не з величиною  $A \in \mathfrak{S}$ , як у детермінованій системі, а з поточним значенням розподілу імовірностей стану індивідів популяції  $P_t(A)$ . Тому, згадуючи в подальшому стан СДС, ми матимемо на увазі величину  $P_t(A)$ . СДС є узагальненням детермінованої системи. Щоб переконатися в цьому, представимо рівняння (5, 6) дельта-функціями

$$\begin{aligned} \Delta(Y/X, A) &= \delta(Y - F(X, A)); \\ P_t(A) &= \delta(A_t - \Phi(A_{t-\tau}, X_{t-\tau}^t)). \end{aligned} \quad (7)$$

Одержані співвідношення тотожні формулам (1, 2).

Рівняння (5, 6) віддзеркалюють точку зору зовнішнього спостерігача, що розглядає реалізацію входу (стимулу)  $X_{t-\tau}^t$  як причину зміни розподілу станів системи. З позицій самої системи зовнішнє середовище також є СДС, яка реагує на реакції даної системи. Цю зовнішню СДС можна представити стохастичними рівняннями:

$$P_t(X/Y) = P_t(B)\nabla(X/Y, B); \quad (8)$$

$$P_t(B) = P_{t-\tau}(B)R(B_{t-\tau}, B_t, Y_{t-\tau}^t), \quad (9)$$

де  $\nabla(X/Y, B)$  – генотип зовнішнього середовища;

$P_t(B)$ , – поточний розподіл стану зовнішнього середовища;

$R(B_{t-\tau}, B_t, Y_{t-\tau}^t)$  – оператор розвитку зовнішнього середовища.

Для даної СДС причиною зміни стану зовнішнього середовища є реалізація виходу  $Y_{t-\tau}^t$ , а наступна поява стимулу  $X_t$  на її вході – відповіддю зовнішнього середовища на реакцію СДС  $Y_t$ . Відзначимо, що рівняння (8, 9) представляють стохастичну модель зовнішнього середовища, вибір якої може бути довільним. Якщо обрати цю модель такою, що  $A \equiv B \in \mathfrak{S}$ , то називатимемо її власною моделлю. Оператори розвитку СДС та оточуючого середовища мають однакові значення:

$$Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^t) = R(B_{t-\tau}, B_t, Y_{t-\tau}^t). \quad (10)$$

Це співвідношення можна розглядати як стохастичний еквівалент умови (4) для детермінованої системи. Дійсно, розбіжність між поведінкою СДС та зовнішнього середовища приводить до невідповідності власної моделі реальному оточенню. Відтак виникають розбіжності між реальними та очікуваними (тобто прогнозованими на основі реалізації  $Y_{t-\tau}^t$ ) значеннями входу СДС  $X_t$ . Наявність статистично значимої розбіжності вказуватиме на те, що обраний механізм релаксації потребує коригування, наприклад, зменшення порогу релаксації  $\delta$ .

До речі, розглядаючи роль порогу релаксації  $\delta$ , звернімо увагу на те, що збільшення цієї величини зменшує точність апроксимації поведінки системи через спостережувані ззовні реакції при релаксації. Це зменшує ступінь детермінованості генотипу СДС, яка представляє спостережувану поведінку системи.

## 5. Інфінітезимальний оператор СДС

Існування індивіда популяції обмежено латентним періодом, тривалість якого визначається дією прихованого механізму релаксації. Певну інформацію про цей механізм дають статистичні співвідношення (5), (6). Щоб з'ясувати його деталі, розглянемо похідну стохастичного рівняння стану (6):

$$\frac{\partial}{\partial t} [P_t(A)] = P_{t-\tau}(A) \frac{\partial}{\partial t} Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^t). \quad (11)$$

Вважаючи, що на інтервалі часу  $(t - \tau, t)$  така похідна існує, знайдемо її значення при  $\tau \rightarrow 0$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} [P_t(A)] \xrightarrow{\tau \rightarrow 0} P_t(A) H(A_t, X_t). \quad (12)$$

Величина  $H(A_t, X_t)$  є інфінітезимальним оператором СДС [8], який характеризує швидкість зміни імовірності існування індивіда системи в даному стані при надходженні стимулу  $X_t$ . Від'ємне значення  $H(A_t, X_t)$  означає зростання імовірності загибелі індивіда в даному стані. Позитивне значення цієї величини свідчить на користь збільшення числа індивідів в цьому стані, тобто їх розмноження.

Якщо  $P_t(A) \neq 0$ , (це справедливо, якщо в популяції присутні індивіди у всіх станах  $A_t \in \mathfrak{X}$ ), диференціальне рівняння (12) має рішення

$$P_t(A) = P_{t_0}(A) \exp \left[ \int_{t_0}^t H(A_\theta, X_\theta) d\theta \right]. \quad (13)$$

Інтеграл у визначнику експоненти описує адитивний процес формування оператора розвитку  $Q(A_{t-\tau}, A_t, X_{t-\tau}^t)$  при надходженні поточних значень входу  $X_t$ . Це відповідає процесу накопичення інформації при тривалому спостереженні.

Припускаючи, що розподіл імовірностей для стану  $P_t(B)$  в (9) є безперервним по  $t$ , знайдемо аналогічні співвідношення для зовнішнього середовища:

$$\frac{\partial}{\partial t} [P_t(B)] = P_t(B) G(B_t, Y_t); \quad (14)$$

$$P_t(B) = P_{t_0}(B) \exp \left[ \int_{t_0}^t G(B_\theta, Y_\theta) d\theta \right]. \quad (15)$$

Тут величина оператора  $G(B_t, Y_t)$  характеризує вплив реакції індивіда популяції на імовірність перебування зовнішнього середовища в даному стані. У випадку власної моделі зовнішнього середовища значення інфінітезимальних операторів СДС та моделі її оточення збігаються:

$$H(A_t, X_t) = G(A_t, Y_t).$$

Безпосередній зв'язок між поточними значеннями інфінітезимального оператора, стану, входу та виходу ЕС, представлений цим співвідношенням, може бути практично використаний для управління процесом релаксації. Поточне значення інфінітезимального оператора, що визначає оцінку поведінки, може надходити ззовні у вигляді компоненти входу системи. При цьому система, що перебуває в латентному стані, одержує ззовні інформацію, необхідну для здійснення релаксації. Якщо система не здатна сприймати таку інформацію, то вступає в дію механізм природного добору: така система просто гине.

## 6. Генетична та позагенетична моделі фіксації досвіду

За визначенням СДС є моделлю популяції, членами якої є детерміновані динамічні системи, що можуть існувати лише протягом латентного періоду. При релаксації члени популяції замінюються своїми нащадками, кількість та стан яких залежать від поточного значення інфінітезимального оператора. Вибір моменту релаксації та напрямку зміни стану виходить за межі функцій індивіда, заданих рівняннями (1), (2). Управління процесом релаксації може здійснювати лише локальне оточення індивіда (капсула), що є відкритою системою, здатною підтримувати виконання умов узгодженості (4). Здатність до побудови такого оточення набувається індивідами популяції шляхом природного добору у процесі еволюції.

Ключовими для природного добору є процеси мутації та схрещування (кроссовера), які забезпечують формування модифікацій генотипу, найбільш пристосованих до умов зовнішнього середовища [9]. Одночасно здійснюється і пошук оточення, що найбільш сприяє збереженню генотипу. Протягом поколінь накопичуються позитивні зміни як генотипу СДС, так і її локального

оточення, які сприяють зростанню періоду релаксації і, відповідно, тривалості життя індивідів і/або чисельності популяції. Ці дві величини – чисельність популяції та тривалість періоду релаксації – характеризують досягнутий ступінь пристосованості СДС до зовнішнього середовища. Вони віддзеркалюють результати накопичення значень інфінітезимального оператора протягом існування популяції і, таким чином, можуть правити за критерій при регулюванні інтенсивності релаксаційного процесу, тобто загибелі/розмноження індивідів популяції. Прикладом такого регулювання є розвиток колоній бактерій, що розмножуються шляхом поділу і знаходять екологічні ніші з кращими умовами оточення.

Модифікації генотипу у процесі еволюції можна назвати генетичним способом фіксації результатів природного добору. Іншим є позагенетичний спосіб фіксації, що базується на використанні для цього властивостей оточуючого середовища. Накопичення значень інфінітезимального оператора, що є оцінками успішності поведінки, здійснюється шляхом формування ланцюжків зворотного зв'язку в локальному оточенні індивіда.

Розглянемо дію такого зворотного зв'язку. Стимул на вході динамічної системи представимо як суму двох складових:

$$X_t = G(Y_{t-\tau}^t) + \xi_t. \quad (16)$$

Перший член цієї суми є проекцією реалізації виходу індивіда  $Y_{t-\tau}^t$ , а другий – складовою дії зовнішнього середовища. Через  $G(\cdot)$  позначено оператор Гріна оточуючого середовища.

Підставляючи значення  $X_t$  з (16) в формулу (1), знайдемо

$$Y_t = F[G(Y_{t-\tau}^t) + \xi_t, A_t]. \quad (17)$$

Припускаючи існування похідної функції  $F(\cdot)$  в околі моменту спостереження  $t^*$  і нехтуючи складовою дією оточення  $\xi_t$ , представимо лінійне наближення значення виходу:

$$Y_t \approx Y_{t^*} + F'(t^*)G(Y_{t^*}^t). \quad (18)$$

Рішеннями цього лінійного рівняння є власні вектори оператора  $G(\cdot)$ . Зовнішні стимули, що є лінійними композиціями цих векторів, вільно поширюються в локальному оточенні індивіда, тоді як інші – пригнічуються. Якщо похідна функції вхід/вихід  $F'(t^*)$  має той же спектр власних векторів, що і  $G(Y_{t^*}^t)$ , то динамічна система буде реагувати лише на ті зовнішні стимули, що містять ці власні вектори. Така вибірковість реакції, що нагадує роботу нейронної мережі Хопфілда [3], пояснює ефективність інкапсуляції детермінованої динамічної системи.

Прикладом позагенетичної моделі є жива клітина, генотип якої міститься в ядрі, відділеному від зовнішнього середовища протоплазмою, яка захищає ядро від зовнішніх впливів і забезпечує обмін речовинами, необхідний для існування та реплікації ядра.

## 7. Стохастична динамічна макросистема

Реплікація індивідів веде до ущільнення внутрішнього простору популяції, що посилює контакти між її індивідами. Завдяки ідентичності генотипу, індивіди здатні інтерпретувати спостережувану поведінку оточуючих ЕС. В результаті поступово формується система внутрішньої комунікації,



завдяки якій стає можливою координація дій індивідів популяції відносно оточуючого середовища. Удосконалення комунікації веде до інтеграції перетворення популяції у макросистему.

Стохастичною динамічною макросистемою (МС) називатимемо скінчену множину елементарних СДС, які мають однаковий генотип, існують у спільному середовищі та здатні спостерігати одна одну. Поведінка кожної елементарної системи (ЕС) залежить від поведінки інших членів МС, які утворюють її оточення. Вхід  $i$ -ї ЕС можна представити як композицію двох складових, одна з яких характеризує спостережувані реакції інших ЕС, а друга – дію зовнішнього середовища МС:

$$X_t^i = G^i V_{t_0}^t \oplus \Xi_t^i, \quad (19)$$

де  $V_{t_0}^t = \{v_{\theta}^1, \dots, v_{\theta}^k, \dots, v_{\theta}^K\}_{t_0}^t$  – реалізація сукупної реакції  $K$  складових макросистеми;

$G^i$  – оператор Гріна для даної ЕС;

$\Xi_t^i$  – складова дії зовнішнього середовища на  $i$ -у ЕС.

Застосування в цій формулі символу композиції  $\oplus$  замість  $+$ , як в (16), пов'язано з тим, що вплив різних чинників на поведінку ускладненої ЕС може бути суттєво різним і не відповідати простій адитивній схемі.

Компоненти вектора  $X_t^i$  можна представити у розгорнутій формі як

$$x_t^i(j) = \int_{t_0}^t \sum_{k=1}^K g(r^{i,j} - r^k, \tau) v_{t-\tau}^k d\tau + \xi_t^i(j), \quad (20)$$

де  $r^{i,j}, r^k$  – координати  $j$ -го входу  $i$ -ї та виходу  $k$ -ї ЕС;

$g(r^{i,j} - r^k, \tau)$  – передаточна функція (функція Гріна) середовища;

$\xi_t^i(j)$  – складова дії зовнішнього відносно МС середовища.

Співвідношення між членами композиції (19) можуть відрізнятися для різних складових макросистеми. В дисперсних макросистемах, де ЕС віддалені одна від одної, найбільш вагомим для кожної ЕС є вплив зовнішнього середовища, тому її поведінка майже не залежить від реакцій решти членів МС. Релаксація даного індивіда також мало впливає на поточну поведінку решти членів популяції. Прикладом може служити колонія бактерій, в якій релаксація відбувається як поділ клітини, що вижила протягом латентної фази. Такий поділ забезпечує передачу естафети життя генотипу від бактерії – предка до її нащадків, але мало впливає на умови існування інших бактерій колонії.

На відміну від дисперсних, в консолідованих макросистемах (КМС) поведінка кожної ЕС більше залежить від реакцій оточуючих ЕС, ніж від зовнішніх стимулів. Така залежність веде до ускладнення внутрішньої структури КМС та спеціалізації її складових. Це можна бачити на прикладі багатоклітинних організмів, в яких клітини знаходяться у різних умовах відносно зовнішнього оточення. Деякі з них виконують функції рецепторів та ефektorів і безпосередньо контактують з зовнішнім середовищем. Реакції рецепторів формують внутрішнє представлення діючих ззовні

стимулів для решти клітин організму. Функцією ефекторів є перетворення реакції внутрішніх клітин на зовнішню реакцію організму. В даному прикладі всі члени КМС мають однаковий генотип, а спеціалізація ЕС досягається, в основному, за рахунок відповідної інкапсуляції генотипу, тобто позагенетичними засобами.

Розглядаючи консолідовану популяцію як цілісну систему, що існує в зовнішньому середовищі, можна застосувати до неї ту саму модель СДС, що і для будь-якої динамічної системи. Вхід та вихід такої моделі визначатимуть спостережувані ззовні стимули та реакції, послідовність яких в часі визначатиме інтегровану поведінку та стан КМС. За цією спостережуваною ззовні поведінкою приховується складна внутрішня поведінка ЕС, що є складовими консолідованої макросистеми. Є підстави вважати, що реакції граничних елементів КМС виконують функцію оцінки значень інфінітезимального оператора МС, які далі поширюються та інтерпретуються у внутрішньому середовищі стосовно функцій, виконуваних всіма ЕС макросистеми. Це припущення, вперше висловлене в нашій роботі [7], можна підтвердити на прикладі навчання багатoshарової нейронної мережі прямого поширення. Стан такої мережі при навчанні визначається значеннями ваги зв'язків між нейронами, які при навчанні за методом зворотного поширення похибки коригуються відповідно до значень градієнта похибки кожного нейрона. Для цього оцінюють похибку на виході мережі як різницю між реальною та очікуваною реакціями ефекторів. Одержані оцінки поширюють через зв'язки мережі у зворотному напрямку від ефекторів до рецепторів і знаходять значення похибки для кожного прихованого нейрона. Обчислюючи похідну цієї похибки по вазі зв'язків, одержують величину градієнта, яка визначає швидкість зміни вагових коефіцієнтів. Коригування ваги зв'язків за цим методом дозволяє ітеративним шляхом досягти мінімуму похибки на виході мережі [3].

Неважко побачити аналогію між методом зворотного поширення похибки та еволюцією поведінки СДС, описуваної рівнянням (13). Дійсно, якщо зважити на те, що значення вагових коефіцієнтів характеризують стан мережі, то легко дійти висновку, що градієнт похибки, який визначає швидкість зміни значень цих коефіцієнтів, є повним аналогом інфінітезимального оператора СДС, оскільки останній представляє відносну швидкість зміни стану індивідів популяції, в даному випадку – вагових коефіцієнтів мережі.

## **8. Розвиток консолідованої макросистеми**

Як і будь-яку СДС, консолідовану макросистему можна представити як популяцію індивідів – детермінованих систем, поведінка яких відповідає рівнянням (1), (2). Індивід КМС може існувати доти, доки виконуються умови узгодження (4), і продовження його існування можливе лише шляхом заміни іншим, стан якого задовольняє цим умовам.

Для КМС здійснити релаксаційний перехід в новий стан набагато складніше, ніж для ЕС, де такий перехід базується на реплікації. Стан індивіда КМС визначається багатьма параметрами: числом складових ЕС, станом та умовами інкапсуляції кожної ЕС, її позицією у складі КМС. Релаксаційні зміни мають охоплювати одночасно всі параметри КМС, тому оцінити, які з них здатні задовольнити умовам узгодження (4), практично неможливо. Природа вирішила цю проблему, винайшовши вегетативний, а згодом і більш досконалий статевий спосіб розмноження

багатоклітинних організмів. При статевому розмноженні формування кожного нового індивіда (онтогенез) КМС починається з реплікації однієї ЕС (зародкової клітини, носія генотипу) і далі повторює стадії еволюції даної КМС. Щоб зменшити ризик загибелі індивіда та прискорити еволюційний процес, початкові стадії розвитку проходять в умовах штучного оточення, створюваного батьківськими індивідами КМС. Кожна стадія полягає у розширенні локального оточення нового індивіда та наступній реплікації складових ЕС. Онтогенез відбувається як нашарування нових ЕС навколо ядра КМС, яке поступово набуває форми дорослого індивіда, здатного самостійно існувати в реальному середовищі. Далі вплив штучного оточення припиняється і індивід продовжує існувати в реальному оточенні, яке вже не гарантує виконання умов узгодження (4). Наступає латентна стадія, протягом якої повинні з'явитись нащадки індивіда КМС, які замінять його на стадії релаксації, коли порушаться умови узгодження для ЕС, що розмежовують внутрішнє та зовнішнє середовище КМС, і руйнування внутрішнього середовища унеможливить існування КМС як цілісної системи.

Через неможливість швидкого відтворення індивідів КМС процес релаксації має починатись набагато раніше закінчення латентної фази. Головною задачею індивідів КМС протягом усього часу їх існування стає формування своїх нащадків. Тому КМС можуть існувати лише у вигляді сімейств – множин індивідів, які знаходяться на різних стадіях свого формування. Наймолодша частина сімейства повинна формуватись у локальному оточенні батьківських КМС. У живій природі найбільшу увагу до нащадків можна бачити у високорозвинених організмів [10]. Це можна спостерігати і на ранніх стадіях еволюції у всіх, без винятку, багатоклітинних організмів.

Штучне відтворення еволюційного процесу при формуванні КМС може вести до певної деформації генотипу складових ЕС, принаймні у найбільш спеціалізованих з них. Про такі деформації свідчать, зокрема, експерименти з стовбурними клітинами ссавців. З цієї причини функції репродукції генотипу у КМС набувають особливого значення. На високих рівнях еволюції для їх виконання формуються спеціалізовані репродукційні підсистеми КМС. Виникає статева система розмноження, що контролює збереження генотипу шляхом перевірки ідентичності генетичного коду в кожному поколінні КМС.

Найбільш помітною ознакою розвитку КМС є збільшення чисельності популяції. Зростання популяції сприяє розширенню локального оточення індивіда та утворенню штучного середовища для формування його нащадків. Таке зростання може не бути монотонним, оскільки у процесі розвитку частина популяції може гинути. Відомо, наприклад, що у ссавців на початкових стадіях розвитку зародку з'являються жабри, які пізніше зникають. Скорочення кількості ЕС може відбуватись і на заключній стадії онтогенезу, при старінні КМС, коли починають переважати процеси деградації популяції. Але загалом, зважаючи на те, що для індивіда КМС метою розвитку є відтворення себе в нащадках, чисельність популяції ЕС може правити за критерій наближення до цієї мети.

## **9. Нервова система, інтелект**

КМС можуть існувати лише як сімейства, що включають індивідів, які знаходяться на різних стадіях розвитку. Такі сімейства можна розглядати як цілісні системи, здатні спостерігати одна одну,

формувати спільне середовище з поліпшеними умовами існування кожного сімейства і кожної КМС. Таке утворення, називатимемо його екосистемою, може включати КМС та МС з різними генотипами, що існують як симбіози – консолідовані об'єднання макросистем, здатних співіснувати тривалий час. У живій природі симбіози найчастіше мають форму трофічних ланцюгів, де продукти життєдіяльності одних видів стають поживою для інших.

Утворення екосистем прискорює еволюційний процес і приводить до посилення як позитивних, так і негативних відносин між КМС, зокрема, конкуренції за спільні ресурси. Переваги набувають ті види КМС, які краще оцінюють стан оточення, прогнозують дії конкурентів, випереджають їх у своїх реакціях. Зростання конкуренції прискорює розвиток засобів внутрішньої комунікації КМС. У складі найбільш розвинених КМС з'являється нервова система, здатна моделювати процеси розвитку. Нервова клітина діє як релаксаційна детермінована динамічна система. Детермінована складова її поведінки формується при навчанні шляхом відповідного настроювання зв'язків (синапсів) нейрона. Коли сумарне значення збуджень, які надходять на синапси, досягає певного рівня, відбувається релаксація, що спостерігається як спайк на виході нейрона – аксоні. Спайк, який має форму короткого імпульсу, поширюється у специфічному середовищі, утвореному розгалуженнями аксона, які закінчуються на синапсах інших нейронів. Потоки спайків від рецепторів відтворюють значення входу КМС. Проходячи через шари прихованих нейронів у напрямку до ефекторів, вони формують реакцію КМС, яка відповідає досвіду, набутому індивідом КМС і зафіксованому у зв'язках між нейронами.

Поведінка нейронної мережі при навчанні відповідає моделі стохастичної динамічної системи. В п.7 ми вже відзначали важливу роль інфінітезимального оператора при формуванні нейронної мережі. Властивості інфінітезимального оператора СДС, набуті протягом всієї еволюції даного виду, закодовані в генотипі ЕС, визначають будову нервової системи, структуру її зв'язків. Розшифровка закодованих в генотипі даних відбувається в онтогенезі шляхом повторення процесу еволюції. На заключних стадіях онтогенезу, коли індивід починає самостійне існування, структура інфінітезимального оператора, що зафіксована у структурі нервової системи, дозволяє правильно реагувати на зовнішні стимули та продовжувати набувати новий індивідуальний досвід, фіксуючи його шляхом коригування зв'язків між нейронами.

На високих рівнях еволюції відбувається поділ нервової системи на периферійну та центральну. Периферійна система є відповідальною за роботу ефекторів. Вона реалізує стереотипи поведінки КМС, зафіксовані на генетичному рівні. Центральна нервова система здійснює інтерпретацію спостережень, які надходять у вигляді потоків спайкової активності від рецепторів, диференціює їх за ступенем важливості для даного індивіда. Перетворення, що відбуваються з потоком спайків при проходженні через шари нейронів, нагадують процеси природного добору, які відповідають моделі стохастичної динамічної системи. Проходження потоку спайків крізь шари нейронів подібне до етапів еволюції, на яких перевагу набувають ті пакети спайків, що в минулому сприяли успішній поведінці індивіда. При наближенні потоку спайкової активності до шару ефекторів більш чітко визначається імовірна реакція і врешті решт формуються значення виходу КМС.

Наведена схематична модель нервової активності дозволяє представити і більш загальні динамічні процеси, пов'язані з мисленням. Як відомо, на вищих етапах еволюції в центральній нервовій системі виокремлюється неокортекс, формується кора головного мозку – багат шарова складчаста структура з інтенсивно розвиненими латеральними зв'язками. Вона виконує функції свого роду резонатора, в якому потоки спайків можуть тривалий час циркулювати у середовищі, яке віддзеркалює як позитивний досвід існування даного виду (генотипу), так і досвід, набутий індивідом за час свого існування. Важливим елементом діяльності неокортексу є спонтанна активність нейронів, яка забезпечує безперервний процес висунення та перевірки гіпотетичних моделей поведінки даного індивіда та його оточення [11]. Цей процес, очевидно, становить сутність мислення та інтелектуальної діяльності. У прихованому вигляді він відбувається на підсвідомому рівні, проявляючись, зокрема, у сновидіннях.

Розвиток інтелекту дозволяє високоорганізованим КМС моделювати свої дії та прогнозувати їх наслідки, що значно збільшує ефективність їхньої поведінки. На вищих етапах еволюції інтелектуальна діяльність стає основним змістом поведінки КМС.

#### **10. Цивілізація, матеріальна та духовна культура**

З появою та розвитком нервової системи прискорюється розвиток засобів комунікації між КМС, зокрема, поліпшується кодування реакцій індивідів. Поряд із удосконаленням сигнальних засобів (звуки, жести) розвивається матеріальна форма передачі інформації. Приклади примітивних матеріальних форм передачі досвіду можна бачити у відкладанні яєць у плазунів та птахів, побудові житла у термітів, слідах феромону у мурах. На високих рівнях розвитку КМС вони набувають форми матеріальної культури. Виникає цивілізація, в якій матеріальні засоби комунікації стають домінуючими в формуванні локального оточення індивідів КМС. Це приводить до того, що існування та відтворення КМС стає цілком залежним від засобів матеріальної культури, а постійне удосконалення цих засобів стає не менш важливим, ніж відтворення самих індивідів КМС. Відбувається переорієнтація критеріїв розвитку. Якщо на попередніх етапах еволюції головним критерієм була чисельність індивідів популяції, то в епоху цивілізації починають домінувати обсяг застосування та якість засобів матеріальної культури, впровадження яких збільшує тривалість життя індивідів КМС.

Корисність предметів матеріальної культури визначається тим позитивним досвідом розвитку, який вони втілюють і яким можуть користуватись індивіди КМС. Такий досвід можуть втілювати не тільки матеріальні об'єкти, але й нематеріальні, наприклад, повідомлення, якими обмінюються індивіди. Нематеріальні форми передачі досвіду набувають особливого значення для формування (виховання) нащадків КМС, створення нових та удосконалення вже існуючих засобів матеріальної культури. Тому поширення матеріальної культури в епоху цивілізації супроводжується розвитком духовної культури, яка накопичує досвід попереднього існування КМС, набуваючи, таким чином, функцій генотипу для цивілізації як цілісної системи. Сама цивілізація є симбіоз КМС та штучного матеріального оточення, які утворюють цілісну систему. Її генотип поєднує генотип індивіда КМС та складову культури, що віддзеркалює досвід розвитку популяції. Тривале існування такої системи в зовнішньому середовищі можливе лише за умов відповідної інкапсуляції. Для нашої

цивілізації засобом інкапсуляції стала Земля, яка протягом мільярдів років забезпечує відносно стабільні умови для появи та розвитку життя.

За доби цивілізації об'єкти матеріальної та духовної культури самі набувають ознак стохастичних динамічних систем, що розвиваються у середовищі, утвореному потребами розвитку самих КМС. Створення таких об'єктів є результатом розвитку відповідних ідей в інтелектуальному середовищі. Творчий процес включає появу початкової ідеї, її оцінку та модифікацію, формування кінцевих рішень. Цей процес може проходити в голові однієї людини, у колективі фахівців або охоплювати ціле суспільство. Ідеї, що в своєму розвитку досягають практичної реалізації, можуть почати самостійне існування як матеріальні об'єкти, виробництво та поширення яких визначається суспільно-економічними відносинами. На шляху від ідеї до практичної реалізації створюваний об'єкт існує серед інших таких об'єктів у віртуальному інтелектуальному середовищі, тобто в головах зацікавлених фахівців. Приклади розвитку наукових ідей та теорій можна знайти у блискучій роботі Т. Куна [12].

Породжуване цивілізацією штучне середовище створює сприятливі умови для розвитку не тільки індивідів КМС та корисних їм штучних об'єктів, але і для об'єктів живої та неживої природи, що не є корисними або навіть загрожують існуванню цивілізації. Прикладами можуть бути техногенні катастрофи, руйнування довкілля та пов'язані з цим епідемії, професійні захворювання, СНІД. До цього переліку за останні десятиліття додаються специфічні проблеми, пов'язані із зростанням інформатизації суспільства. Поряд з проблемою інформаційного вибуху [13], виявленою майже сторіччя тому, нову загрозу цивілізації становлять комп'ютерні віруси та комп'ютерні злочини.

## **11. Підсумкові зауваження**

У розглянутій нами моделі розвитку ключовим є твердження, що в довільному оточуючому середовищі детермінована динамічна система поводить себе як релаксатор. Така система може існувати тільки протягом скінчених інтервалів часу, поки розбіжності поведінки системи та її оточення не виходять за певну межу і залишаються непомітними для зовнішнього спостереження. В моменти релаксації стан системи стрибком змінюється, нейтралізуючи ці розбіжності. Ці стрибки стану спостережуються ззовні як реакції системи. Релаксційна поведінка відповідає моделі стохастичної динамічної системи, яка описує також процеси розвитку популяцій, зливи, тощо. Поширення процесу релаксації в часі на простір привело нас до моделей інкапсуляції та реплікації, які дозволили представити співіснування детермінованої системи та її оточення як обмін речовинами, притаманний процесам живої природи.

Одержана нами модель представляє розвиток як еволюційний процес поетапного формування ієрархічної послідовності структур, що забезпечують збереження даної детермінованої системи у складі генотипу цієї послідовності. Формування структури на кожному етапі еволюції має такі фази: інкапсуляцію генотипу даного етапу, реплікацію, утворення популяції, перетворення популяції на структуровану макросистему, внутрішнє середовище якої забезпечує її цілісність. Кожен етап завершується формуванням генотипу для наступного етапу еволюції. Цей генотип

розглядається як детермінована система, входи та виходи якої є зовнішніми входами та реакціями сформованої на даному етапі макросистеми.

Центральне місце у пропонованій нами моделі посідає поняття генотипу - елементарної системи (детермінованої або стохастичної), збереження якої становить мету розвитку на даному та наступних етапах еволюції. Розвиток – це упорядкована в часі послідовність реалізацій генотипу. Імовірність самостійного існування в зовнішньому оточенні для нього зменшується за експоненціальним законом, тому збереження можливе лише, якщо швидкість розмноження перевищує швидкість загибелі. Запропонована модель пояснює, яким чином Природа вирішила проблему виживання генотипу, принаймні в умовах Землі. Знайдена первинна білкова молекула була здатною до реплікації та існування достатній час, щоб утворити популяцію і запустити механізм природного добору. Процес еволюції почався з інкапсуляції цієї молекули та утворення найпростіших одноклітинних організмів і, нарешті, досяг рівня людської цивілізації. Запропонована модель пояснює головні етапи цього процесу, зокрема, появу нервової системи, формування інтелекту, утворення матеріальної та духовної культури. Ця модель придатна для моделювання процесів управління складними економічними та екологічними системами, вивчення та прогнозування інформаційних процесів сучасного науково-технічного та суспільно-економічного розвитку.

Пропонована модель не дає відповіді на важливе питання про джерела розвитку. Здається очевидним, що існування динамічної системи можливе лише завдяки енергії, яка вивільнюється або поглинається при релаксації та спостереженнях. Але об'єкти, що виявляють ознаки розвитку у віртуальному середовищі (інформаційні повідомлення, чутки і та ін.), які поширюються у суспільстві, реалізуються у вигляді певних змін поглядів або поведінки людей, тобто за межами цього середовища. Тому чинник енергії у процесах розвитку не є абсолютним і не виключено, що модель розвитку, запропонована нами, може змусити змінити ставлення до цієї фундаментальної категорії. З'ясування цього питання має стати предметом подальшого дослідження.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 399 с.
2. Срагович В.Г. Теория адаптивных систем. – М.: Наука, 1976. – 317с.
3. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 343 с.
4. Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – Prentice Hall, 1995. – 932 p.
5. Резник А.М. Моделирование информационных процессов научно-технического развития. – К.: Знание, 1978. – 28 с.
6. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем. Математические основы. – М.: Мир, 1978. – 311 с.
7. Резник А.М. Многорядные динамические перцептроны // Перцептрон – система распознавания образов / ред. А.Г. Ивахненко. – К.: Наукова думка, 1975. – С. 243 – 292.
8. Данфорд Н., Шварц Дж. Линейные операторы. Общая теория. – М.: ИЛ, 1962. – 895 с.
9. Грант В. Эволюция организмов. – М.: Мир, 1980. – 407 с.
10. Шовен Р. От пчелы до гориллы. – М.: Мир, 1965. – 295 с.
11. Резник А.М. Обучение на нейронном уровне и спонтанная активность: Сб. Статистическая электрофизиология. – Ч.1: Материалы симпозиума 12 – 18 августа 1968 г. Паланга. – Вильнюс, 1968. – С. 481 – 496.
12. Кун Т. Структура научных революций. – М.: Прогресс, 1975. – 246 с.
13. Михайлов А.И., Черный А.И., Гиляревский Р.С. Научные коммуникации и информатика. – М.: Наука, 1976 – 435 с.