

## МОДЕЛЬ СТІЙКОСТІ АГЕНТНОЇ СИСТЕМИ СИТУАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

**Анотація.** При управлінні складними системами доцільно використовувати адекватні реальним системам математичні моделі, які можуть бути використані для узагальненого модельного аналізу різних варіантів рішень у системах ситуаційного управління (ССУ). Такі математичні моделі є важливою складовою ССУ у процесах підтримки прийняття важливих стратегічних та оперативних рішень на різних рівнях державного управління. Реалізація ССУ у вигляді мультиагентної системи, завдяки своїм характеристикам, є адекватним підходом до вирішення задач ситуаційного управління (СУ). Відповідно до контексту СУ, поведінка ССУ описується як динаміка руху з певної точки у фазовому просторі, що відповідає деякому стану керованої системи, під впливом ансамблю агентів ССУ. Під час функціонування ССУ її агенти використовують знання, які відповідають контексту ситуації. Знання агента є фрагментом області знань із цільової проблеми СУ. Знання проблемної області СУ є ключовим елементом моделі СУ. Ансамбль конвергентних агентів ССУ характеризується певним рівнем інтелекту, який представляється як ентропійна сила, що використовує вільну енергію дисипативної системи для підтримки її стійкості. Запропоновано агентно-орієнтований підхід до дослідження стійкості динамічної стохастичної системи у процесі ситуаційного управління як цільової проектної діяльності. В рамках запропонованого підходу розглядається модель стійкості агентної ССУ як динамічної стохастичної системи з використанням критерію стійкості за Ляпуновим у формі системи звичайних диференціальних рівнянь. Підтримка функцій моделювання агентами агентно-орієнтованої системи дозволяє формувати адекватну поведінку у процесі ситуаційного управління в умовах змін оточуючого середовища. Розроблені моделі інтеграції поведінкових та координаційних аспектів агентів на основі знань можуть бути використані при розробці систем та технологій ситуаційного управління.

**Ключові слова:** система ситуаційного управління, стійкість за Ляпуновим, мультиагентна система.

**Аннотация.** При управлении сложными системами целесообразно использовать адекватные реальным системам математические модели, которые могут быть использованы для обобщенного модельного анализа различных вариантов решений в системах ситуационного управления (ССУ). Такие математические модели являются важной составляющей ССУ в процессах поддержки принятия важных стратегических и оперативных решений на различных уровнях государственного управления. Реализация ССУ в виде мультиагентной системы, благодаря своим характеристикам, является адекватным подходом к решению задач ситуационного управления (СУ). В соответствии с контекстом СУ, поведение ССУ описывается как динамика движения из определенной точки в фазовом пространстве, соответствующей некоторому состоянию управляемой системы, под влиянием ансамбля агентов ССУ. Во время функционирования ССУ ее агенты используют знания, которые соответствуют контексту ситуации. Знание агента является фрагментом области знаний целевой проблемы СУ. Знания проблемной области СУ являются ключевым элементом модели СУ. Ансамбль конвергентных агентов ССУ характеризуется определенным уровнем интеллекта, который представляется как энтропийная сила, использующая свободную энергию диссипативной системы для поддержания ее устойчивости. Предложен агентно-ориентированный подход к исследованию устойчивости динамической стохастической системы в процессе ситуационного управления как целевой проектной деятельности. В рамках предложенного подхода рассматривается модель устойчивости агентной ССУ как динамической стохастической системы с использованием критерия устойчивости Ляпунова в форме системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Поддержка функций моделирования агентами агентно-ориентированной системы позволяет формировать адекватное поведение в процессе ситуационного управления в условиях изменений окружающей среды. Разработанные модели интеграции поведенческих и координационных аспектов агентов на основе знаний могут быть использованы при разработке систем и технологий ситуационного управления.

**Ключевые слова:** система ситуационного управления, устойчивость по Ляпунову, мультиагентная система.

**Abstract.** While managing complex systems, it is advisable to use mathematical models adequate to real systems, which can be used for generalized model analysis of different solutions in systems of situational management (SSM). Such mathematical models are an important component of the SSM in the process of supporting the adoption of important strategic and operational decisions at various levels of government. Implementation of SSM in the form of a multi-agent system, due to its characteristics, is an adequate approach to solving the problems of situational management (SM). According to the context of SM, the behavior of the SSM is described as the dynamics of movement from a certain point in the phase space, that corresponds to some state of the managed system under the influence of the ensemble of SSM agents. During the operation of the SSM, its agents use knowledge that corresponds to the context of the situation. The agent's knowledge is a fragment of the field of knowledge on the target problem of SM. Knowledge of the problem area of the SM is a key element of the SM model. The convergent agents' ensemble of SSM is characterized by a certain level of intelligence, which is represented as an entropic force that uses the free energy of the dissipative system to maintain its stability. An agent-oriented approach to the study of the stability of a dynamic stochastic system in the process of situational management as a target project activity is proposed. Within the scope of the proposed approach, the stability model of agent SSM as a dynamic stochastic system is considered using the Lyapunov stability criterion in the form of a system of ordinary differential equations. Support of modeling functions by agents of agent-oriented system allows to form adequate behavior in the process of situational management in the conditions of changes in the environment. Developed models for integrating behavioral and coordination aspects of knowledge-based agents can be used in the development of situational management systems and technologies.

**Keywords:** situational management system, Lyapunov stability, multiagent system.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-3-93-104

## 1. Вступ

Ефективне управління в різних сферах діяльності потребує нових форм організації наукових досліджень та імплементації їх результатів до контуру управління, які є основою для підготовки та прийняття комплексних міждисциплінарних рішень в умовах конкурентної моделі розвитку. За цих обставин використання традиційних вузькоспеціалізованих підходів для всебічного, комплексного аналізу економічної, соціальної, політичної та військової ситуації є недостатнім через притаманні їм системні обмеження.

У розділі 1 звіту «Come On!» Римського клубу [1] зазначається: «Криза сама по собі має не циклічний характер, а постійно зростає. І це не обмежується тільки оточуючим середовищем навколо нас. Існує також соціальна криза, політична та культурна криза, моральна криза, а також криза демократії, ідеології та капіталістичної системи. Криза також полягає у глибокій бідності в багатьох країнах і втраті робочих місць для значної частини населення у всьому світі». Також, у розділі 3 звіту «Come On!» [2] стверджується: «Людство прямує до катастрофи. Загальний системний колапс є реально можливим. ... Ми зіткнулися з серйозними викликами, зумовленими стрімким ростом населення, надмірним використанням ресурсів і, як наслідок, забрудненням навколишнього середовища, а також втратою біорізноманіття та зменшенням доступності систем підтримки життя. ... Зрештою це ганебно з інтелектуальної точки зору. Шлях до кращого майбутнього реально існує. Отже, прямим обов'язком кожного є спробувати створити цей кращий світ. Людство може уникнути колапсу. Але для протистояння кризі необхідний новий наратив, тоді ж як нинішній на повній швидкості несе людство до катастрофи. Саме новий наратив міг би вказати нам, як досягти процвітання життя у навколишньому середовищі, забезпечити загальне благополуччя, задовольнити основні потреби всіх людей і забезпечити достатню рівність для підтримки соціальної стабільності й забезпечення основ справжньої безпеки».

При управлінні складними системами доцільно використовувати адекватні реальним системам математичні моделі, які можуть бути використані для модельного аналізу

різних варіантів рішень у системах ситуаційного управління (ССУ). Такі математичні моделі є важливою складовою ССУ у процесах підтримки прийняття важливих стратегічних та оперативних рішень на різних рівнях державного управління. Базова концепція такого підходу була розроблена видатним вченим-кібернетиком В.М. Глушковим у рамках проєкту ЗДАС [3, 4]. Концепції та напрями використання теорії В.М. Глушкова і способи її застосування залишаються актуальними і в сучасних умовах розвитку суспільства.

Прийняття адекватних рішень при управлінні складними системами ґрунтується на концепції потрійного критерію (Triple Bottom Line, TBL) [5], що реалізується як ситуаційне управління на основі комплексної оцінки не лише економічних, а й соціальних і екологічних результатів функціонування керованої системи.

Термін «ситуація» сам по собі визначається масштабом, сферою та контекстом його використання. Семантика (зміст) ситуації визначається модальністю, яка виражає зв'язок між ситуацією та реальністю (об'єктивною модальністю), суб'єктом і ситуацією (суб'єктивною модальністю). Таким чином, ситуація – це усвідомлене знання окремих суб'єктів про динаміку і контекст відношень між сутностями навколишнього середовища, представлене певними типами інформаційних повідомлень, які є основою для побудови обґрунтованої інтерпретації послідовності змін у станах (динаміці) світу (предметної сфери) з певної точки зору [6].

Ситуаційне управління (СУ) – це метод управління, заснований на використанні множини концепцій, моделей та наявних технологій для розпізнавання, пояснення, впливу та прогнозування ситуацій, які виникли або можуть виникнути в динамічній системі протягом визначеного часу роботи [7]. СУ реалізується як складна багаторівнева технологія з комплексом різноманітних взаємопов'язаних завдань, притаманних кожному рівню. СУ реалізується за допомогою ССУ. Основною особливістю функціонування ССУ є необхідність створення адресних спеціальних завдань для цілей ситуаційного управління з використанням відповідної архітектури ССУ. ССУ забезпечує єдність та сумісність різних підходів, моделей, інформаційного забезпечення та великих баз даних і державних реєстрів для різних сфер діяльності при підготовці, підтримці й прийнятті важливих рішень. Також вони підтримують стратегічне комплексне забезпечення спроможностей при проведенні різних видів операцій. У ССУ застосовуються сучасні інструменти соціально-економічного моделювання, аналізу та прогнозування ситуаційних задач, що виникають у процесах різних рівнів управління та складності.

*Метою дослідження* є побудова моделі стійкості агентної системи ситуаційного управління на основі врахування інтегрованого інтелектуального потенціалу агентів-учасників процесу ситуаційного управління, який формується на основі моделі знань предметної сфери.

## **2. ССУ – інструментарій інформаційної та модельної підтримки процесів управління**

ССУ відносяться до категорії складних систем через притаманні складним системам властивості [8]: відкритість, казуальність, непередбачуваність поведінки в умовах змін (навіть незначних) оточуючого середовища, здатність до самоорганізації, ієрархічність та поліструктурність підрівнів організації системогенезу, здатність до самовідтворення в умовах ієрархічного системогенезу. При системогенезі ССУ враховуються складність структури, ситуативний характер зв'язків між компонентами, ситуативність сценаріїв поведінки за різних умов, велика кількість параметрів і змінних, неповнота і недетермінованість джерел інформації, різноманітність інформаційно-ймовірнісної природи зовнішнього середовища тощо.

Обмежені можливості експериментального дослідження альтернативних варіантів при прийнятті рішень у рамках ССУ вимагають використання адекватних методів моделювання складних процесів, що дозволяє представити в належній формі процеси функціону-

вання складних систем та системи систем. Це також надає можливість описати процеси у цільових системах із використанням математичних моделей для отримання результатів імітаційних експериментів із такими моделями для оцінки параметрів і стану досліджуваних об'єктів. Більше того, на різних етапах створення та застосування прикладних методів для представлення всього різноманіття підсистем метод математичного моделювання та обчислювального експерименту має конкретні специфічні цілі. Ефективність методів моделювання залежить від професійності та аналітичних спроможностей експертів та осіб, які приймають рішення при застосуванні модельного підходу.

Незалежно від декомпозиції конкретної складної системи на підсистеми при проектуванні ССУ спочатку проводиться макропроектування та конструювання, а потім внутрішнє конструювання і проектування (структурне та функціональне проектування). На етапі макропроекту розробляється узагальнена модель складної системи та відповідних процесів, що дозволяє розробнику отримати відповіді на питання про ефективність різних стратегій управління об'єктами, коли ці об'єкти взаємодіють із середовищем у рамках застосування ССУ. Цей етап можна розбити на етапи аналізу та синтезу. В ході аналізу вивчається об'єкт управління, будується модель впливу на навколишнє середовище, визначаються критерії оцінки ефективності використання наявних ресурсів та виявляються іманентні (внутрішньо притаманні) та необхідні обмеження. Кінцевою метою етапу аналізу є побудова моделі управління об'єктом та визначення її оцінюваних характеристик для вивчення конкретних завдань ситуаційного управління та їх вирішення. Під час синтезу на стадії зовнішнього проектування вирішуються завдання вибору стратегії управління, які ґрунтуються на вивченні та дослідженні моделі об'єктів управління, які є складними, комплексними системами.

### **3. Агентно-орієнтоване ситуаційне управління на основі знань**

Реалізація ССУ у вигляді мультиагентної системи (МАС) [9], завдяки притаманним їм характеристикам, є адекватним підходом до вирішення задач СУ [10]. МАС може бути використана як допоміжний інструмент для організації та підтримки інтегрованих середовищ СУ. Такий тип середовищ СУ будемо називати агентно-орієнтованими середовищами ситуаційного управління (АОССУ).

Ефективна ССУ повинна інтегрувати в собі нові інформаційні технології, можливості людини, останні досягнення в області прийняття рішень та на їх основі дозволяє здійснювати колективне прийняття рішень, аналіз і прогнозування їх результатів [11]. Створення ефективних ССУ пов'язане з конвергенцією знань, інтелектуальних та професійних спроможностей залучених до СУ осіб із можливостями, які надаються інтелектуалізованими комп'ютерними засобами. Отже, основою АОССУ є конвергентні ситуаційні агенти [12], що розглядаються як цілісні компоненти ССУ, здатні вирішувати задачі різних рівнів на всіх етапах СУ.

Однією з умов успішної діяльності будь-якої організаційної структури, в тому числі ССУ, є ефективне управління, яке враховує специфіку її операційної діяльності. При СУ в рамках ССУ реалізуються такі етапи:

- Моніторинг об'єкта управління.
- Визначення учасників (аналітики, експерти, особи, які приймають рішення) процесів ситуаційного управління.
- Системний аналіз ситуації (аналіз поточного та прогнозування очікуваних станів об'єкта управління, моделювання еволюції подій в об'єкті управління тощо).
- Формування та прийняття рішень шляхом нарад та обговорень.
- Реалізація рішень (визначення виконавців, вироблення вказівок та моніторинг виконання прийнятих рішень).

- Ретроспективний аналіз (оцінка) якості та ефективності виконання прийнятих рішень.

При здійсненні процесу ситуаційного управління на кожному етапі в АОССУ використовуються різні типи агентів. Конвергентні агенти на різних рівнях виконують функції диспетчеризації, координації, забезпечення безпеки, пошуку та надання доступу до сервісів тощо. Тобто, вирішення задач різних стадій та етапів СУ виконується відповідними групами конвергентних агентів в АОССУ з урахуванням особливостей кожного етапу. Конвергентні агенти виступають як активні елементи, що забезпечують інтеграцію та адаптацію сервісів для вирішення конкретних задач ситуаційного управління. Взаємодія між агентами визначається моделлю управління, прийнятою в ССУ. Моделі агентів для кожного етапу СУ повинні враховувати аспекти комунікації та координації – формалізацію опису ситуації, паралельне управління процесами, механізми оркестрування та хореографії процесів, обмін повідомленнями тощо.

Під час функціонування ССУ її агенти використовують знання, які відповідають контексту ситуації. Знання агента є фрагментом області знань для цільової проблеми СУ. Знання проблемної області СУ є елементом моделі СУ. Управління знаннями ССУ є одним із ключових факторів ефективного СУ. Отже, знання є визначальним ресурсом, а управління знаннями є важливим компонентом функціонування ССУ. Модель предметної області знань визначається архітектурною моделлю ССУ та її контекстом взаємодії з оточуючим середовищем [13]. Специфікою управління знаннями при СУ є наявність двох областей знань. Перша область пов'язана з підтримкою функціонування ССУ, а друга – безпосередньо із проблемною сферою СУ, на яку направлено вплив ССУ. З урахуванням змінюваності та проактивності знань, а також їх розподілу на явні (формалізовані) та неявні (суб'єктивні, неформалізовані) знання, носіями яких можуть бути окремі агенти, групи агентів або організації, Ікуджіро Нонакою була запропонована модель трансформації корпоративних знань між рівнями носіїв знань [14]. Така модель представлена на рис. 1. Архітектура ССУ забезпечує реалізацію процесу СУ як композицію мотивацій, знань, спроможностей, ресурсів та обмежень.

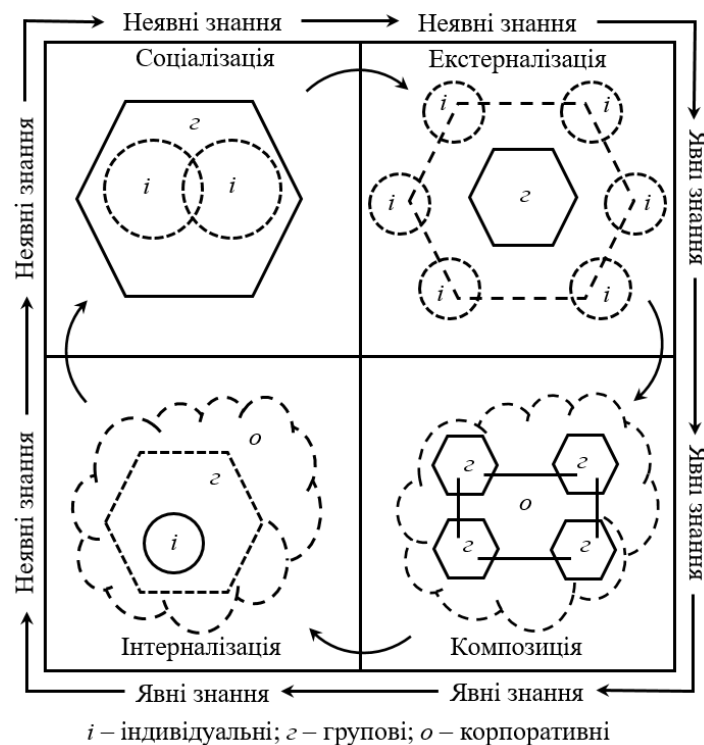


Рисунок 1 – SEKI-модель трансформації корпоративних знань

Модель трансформації знань І. Нонаки отримала назву СЕКІ-модель відповідно до назв механізмів трансформації неявних знань у явні і, навпаки, на різних рівнях корпоративної архітектури. Механізми інтерналізації забезпечують підтримку засвоєння знань окремими індивідами (суб'єктами). Механізми соціалізації забезпечують формування колективних (групових) знань стосовно цільової області зацікавленості групи людей, зокрема, в рамках малих експертних груп. Механізми екстерналізації забезпечують поширення знань цільової області, сформованої групою експертів в середині організації. Механізми композиції (комбінації, конвергенції) забезпечують застосування знань цільової області, які усвідомлені і засвоєні персоналом організації, при здійсненні організацією цілеспрямованої діяльності. Така модель дозволяє виділити формалізовану і неформалізовану складові знань і пов'язати їх із природними або штучними (технічними) носіями, які на основі конвергенції компонентів цих знань здатні формувати цілеспрямовану ситуаційну поведінку у процесі СУ.

Поведінка агентів у МАС описується теорією основних дій (ТОД, Basic Action Theory, BAT) [15], яка формалізує дії агентів. ТОД, як правило, описує дію як поведінку, викликану агентом у певній ситуації. Бажання і переконання агента визначають його мотивації, наміри та поведінку. Основними поняттями в обчисленні ситуації є ситуації, дії та флуенти. Дії – це те, що змінює динамічний світ від однієї ситуації до іншої під час функціонування агента. Флуенти – це контекстно залежні від ситуації функції, що використовуються для опису впливу дій. Областю визначення флуента є множина усіх можливих ситуацій. Існують два види флуентів: реляційні і функціональні. Щоб описати динаміку домена в ситуаційному численні, потрібно визначити множину дій, доступних для виконання агентами, і множину флуентів, необхідних для опису змін, які відбудуться у світі внаслідок цих дій. Таким чином, ТОД описує ситуаційний аспект діяльності агента.

Мови числення дій та опису дій є засобом подання подій та контекстно керованої поведінки агентів. Мови опису дій є формалізованими мовами для опису наслідків та можливості виконання дій. Найвідомішою мовою дій є PDDL (Planning Domain Definition Language, мова визначення планування домена) та його агент-орієнтована версія MA-PDDL. PDDL на основі SRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver), яка концептуально та в математичній формалізації подається як четвірка  $\langle P, O, I, G \rangle$ , де  $P$  є множиною умов,  $O$  являє собою множину операторів (тобто, дії) (кожен оператор є власне четвіркою  $\langle \alpha, \beta, \gamma, \delta \rangle$ , кожен елемент є множиною умов, де множина  $\alpha$  визначає умови, які повинні виконуватись для виконання дії, множина  $\beta$  – умови, які не повинні виконуватись перед виконанням дії,  $\gamma$  – умови, які виконуються після виконання дії,  $\delta$  – умови, які не виконуються після виконання дії),  $I$  є початковим станом, заданим як множина умов, які спочатку є істинними,  $G$  – це специфікація цільового стану (подається як задана пара  $\langle N, M \rangle$ , що вказує, які умови є істинними та хибними, відповідно, для того, щоб стан вважався цільовим). Мови дій містять опис залежних від подій аспектів поведінки агентів. Як наслідок, інтегрована поведінкова модель ситуаційного агента представляється як кортеж [16]:

$$A_b = \langle T, P, C, M, D \rangle, \quad (1)$$

де  $T$  – множина засобів опису ситуації,  $P$  – множина засобів управління комунікаціями в змінних середовищах комунікацій,  $C$  – множина засобів механізмів координації,  $M$  – засоби обміну повідомленнями між агентами,  $D$  – множина засобів опису дій.

Модель координованої діяльності створюється для забезпечення належного функціонування системи ситуаційного управління відповідно до її організаційної структури, яка підтримується відповідними ситуаційними агентами. Конвергентні агенти

організовані в ієрархії відповідно до рівня абстракції та спеціалізації їх функцій, що забезпечують доступ до послуг у процесі ситуаційного управління. Координація функціонування системи здійснюється конвергентними ситуаційними агентами, на основі керування послугами нижчого рівня агентами вищого порядку та координування послуг на одному рівні процесу управління у разі ситуаційного управління під час вирішення конкретних проблем. Тому, відповідно до контексту ситуаційного управління, поведінка ССУ може бути описана як динаміка руху з точки деякого стану керованої системи у фазовому просторі під впливом ансамблю агентів управління ССУ.

ССУ в загальному випадку є нерівноважною відкритою нелінійною динамічною системою. Такі системи називаються дисипативними [17]. Внаслідок самоорганізації в дисипативних системах утворюються стійкі структури, які існують завдяки витрачання (дисипації) системою енергії. Підтримка таких складних систем пов'язана зі зростанням ентропії в середині системи, яка компенсується негативним потоком ентропії з оточуючого середовища. Дисипативні процеси, пов'язані з обміном енергії в середині дисипативної системи та з зовнішнім середовищем, проходять у нерівноважних умовах і наближають систему до стану рівноваги. Поведінка ансамблю агентів може бути інтерпретована в контексті керованої дисипативної системи, що знаходиться під впливом ентропійних сил [18]. Таким чином, можна стверджувати, що у загальному випадку ССУ має стохастичну природу.

Оскільки керована агентами ССУ розглядається як нерівноважна динамічна стохастична система, то головною метою ансамблю агентів є збереження керованої стохастичної системи у стійкому (стабільному) та передбачуваному стані. Така динамічна стійкість досягається шляхом використання принципу стійкості за Ляпуновим [19].

За аналогією з термодинамічними системами, рівноважний стан системи визначається мінімумом вільної енергії Гельмгольца (ентропійної енергії). У класичному розумінні, нерівноважна динамічна стохастична система як модель фізичної системи, що спрямовується на досягнення максимального значення ентропії [20], еволюціонує через послідовність досягнення макроскопічних станів із вищими рівнями ентропії [21]. Такий процес характеризується формалізмом дії ентропійних сил [22]. Для канонічного ансамблю ентропійна сила  $F$  пов'язана з розділом на множину макростанів  $\{X\}$  через температуру замкненого простору  $T$ , ентропія  $S(X)$ , пов'язана з макростаном  $X, X_0$ , є поточним макростаном.

Конвергентні агенти ССУ характеризуються певним рівнем інтелекту. Формально інтелект агентів як ентропійну силу  $F$  канонічного ансамблю агентів можна визначити так [23]:

$$F(X_0, \tau) = T_c \nabla_x S_c(X, \tau) |_{x_0}, \quad (2)$$

де сила  $F$  (вибір, реалізація управлінських рішень на основі моделі поведінки (1) конвергентного агента) діє так, щоб максимізувати майбутню свободу дій або залишатись із відкритими варіантами управління з певною цілеспрямованістю (знаннями та обізнаністю)  $T_c$ , з множиною (різноманіттям) можливих доступних варіантів майбутнього (майбутні ситуації, цільові точки в фазовому просторі)  $S_c$  із певним майбутнім часовим горизонтом (рівнем)  $\tau$ .  $X = \{x_i | i = 1, 2 \dots n\}$  – це множина стохастичних параметрів. Тобто, можна стверджувати, що інтелект прагне уникати будь-яких пасток. Також,  $T_c$  можна інтерпретувати як параметризацію рівня, на якому шляхи в гіпотетичному динамічному ансамблі всіх можливих фіксованих тривалостей шляхів переходять один в інший, аналогічно переходам між конфігураційними мікростанами ідеального ланцюга, що має відповідну ентропійну пружність, тобто силу, знання та обізнаність агентів.

#### 4. Адаптація моделі стійкості за Ляпуновим для ССУ

Метою ситуаційного управління є уникнення можливих кризових ситуацій та утримування керованих параметрів стохастичних дисипативних систем у заданих межах «нормального» стійкого функціонування. Специфічні характеристики та спроможності ансамблю конвергентних агентів визначаються статистичними властивостями керованої системи. Функціонування системи ситуаційного управління ґрунтується на координації її компонентів. Модель координованої діяльності створюється для забезпечення належного функціонування системи ситуаційного управління відповідно до її організаційної структури, яка підтримується відповідними конвергентними агентами. Конвергентні агенти організовані в ієрархії відповідно до рівня абстракції та спеціалізації їх рольових функцій в архітектурі ССУ і забезпечують доступ до сервісів, які підтримують процеси ситуаційного управління. Координація функціонування агентів здійснюється шляхом керування послугами нижчого рівня агентами вищого порядку та координацією сервісів одного рівня у процесі ситуаційного управління при вирішенні конкретних проблем [16, 24].

Впровадження ситуаційного моделювання (СМ) можна описати моделями, заснованими на проектному підході та процесах його реалізації. Управління життєвим циклом проекту є важливою складовою цього підходу. Питання управління життєвим циклом проектів надається стандартом ISO/IEC/IEEE 16326:2019 – Systems and Software Engineering – Life Cycle Processes – Project Management [25]. Крім того, стандарт ISO 21500-2012 – Guidance on project management [26] є першим стандартом у низці стандартів управління проектами та встановлює принципи й процедури, в яких представлені найкращі практики управління проектами, з урахуванням узагальнених знань з управління вимогами та якістю, викладеними у РМВОК [27].

Життєвий цикл СУ як цільова діяльність реалізується через послідовність процесів [6]: усвідомлення ситуації → оцінка ситуації, визначення мети СУ, розробка альтернативних планів → підбір плану для досягнення цілей СУ, організація процедур прийняття рішень → реалізація плану СУ, моніторинг та коригування плану реалізації СУ → оцінка результатів СУ, збереження результатів проведених заходів СУ.

Ситуаційне моделювання в ССУ реалізується як проектна діяльність, яка вимагає задоволення умов стійкості за Ляпуновим [19] керованої динамічної стохастичної системи. ССУ як динамічна стохастична система керується ансамблем агентів з інтелектом  $F$  (2). Модель динамічної стохастичної системи характеризується набором стохастичних параметрів  $X = \{x_i | i = 1, 2 \dots n\}$ . Під час ситуаційного управління або життєвого циклу системи комплекс параметрів  $X$  еволюціонує як послідовність множин, отриманих у результаті керуючого впливу на керовану систему в цілому. Визначимо різноманітність можливих доступних тенденцій  $S_C$  у майбутньому (2) як  $\nabla_x S_C(X, \tau) = dx_i/dt$ . Агрегована модель динамічної стохастичної системи зі зсувними в часі аргументами має такий вигляд:

$$dx_i/dt = (N_i - x_i) \cdot (a_{i0} + \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot (N_j - x_j)), \quad (3)$$

де  $x_i$  –  $i$ -й параметр моделі,  $N_i$  – максимально можливі значення  $i$ -го параметра,  $a_{ij}$  – коефіцієнти, які визначаються зі статистики об'єкта,  $n$  – кількість параметрів,  $i = 1, 2 \dots n$ . У загальному випадку  $a_{ij}$  може бути деякими функціями від часу,  $N_i$  може варіюватися залежно від досліджуваної проблеми (тактичне або стратегічне планування, дослідження критичних ситуацій, прогнозування певних рівнів розвитку, наприклад, бажаних рівнів, параметрів тощо).

За певних умов система може затримуватися або просуватися в часі відповідно до індивідуальних параметрів, наприклад, через те, що в реальній системі кожен елемент ке-



рування являє собою сигнал із певним кінцевим рівнем розповсюдження і обробки інформації, що також займає деякий час. Тому, беручи до уваги ці особливості, можна вводити затримки і випередження для кожного параметра керованої системи. Очевидно, що, у свою чергу, часові затримки та випередження можуть бути також функціями часу, що ускладнює завдання керування. Враховуючи перше наближення щодо постійних часових затримок (зсувів часу), можна подати агреговану модель досліджуваного об'єкта у такому вигляді:

$$\begin{bmatrix} dz_1/dt \\ dz_2/dt \\ \dots \\ dz_{M-1}/dt \\ dz_M/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1(t - \tau_{10}) \\ z_2(t - \tau_{20}) \\ \dots \\ z_{M-1}(t - \tau_{M-1}) \\ z_M(t - \tau_M) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_{10} + \sum_{j=1}^M b_{1j} \cdot z_j \cdot (t - \tau_{1j}) \\ b_{20} + \sum_{j=1}^M b_{2j} \cdot z_j \cdot (t - \tau_{2j}) \\ \dots \\ b_{(M-1)0} + \sum_{j=1}^M b_{(M-1)j} \cdot z_j \cdot (t - \tau_{(M-1)j}) \\ b_{M0} + \sum_{j=1}^M b_{Mj} \cdot z_j \cdot (t - \tau_{Mj}) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $z_i$  – відхилення  $i$ -го параметра  $x_i$  агрегованої моделі системи,  $\tau_{ij}$  – постійні зсуви часу (затримки) з діапазону майбутнього часового горизонту  $\tau$  (2) для відповідних змінних,  $b_{ij}$  – коефіцієнт для відповідного  $z_i$  (відхилення  $i$ -го параметра), який визначається зі статистики динамічної поведінки об'єктів,  $M$  – кількість параметрів,  $i=1, 2 \dots M$ . Попереднє значення може бути введено так само, як зміна знаку на протилежний.

Математична модель (4) описує еволюцію, наприклад, динамічного нестійкого в часі об'єкта залежно від його попередньої історії функціонування. Система рівнянь (4) може бути перетворена та спрощена в обмеженому околі значення поточного моменту часу  $t$ , якщо застосовувати розклад у ряд Тейлора для функцій  $z_i(t - \tau_{ij})$ . Для цього використовуємо теорему Ельсгольца [28], враховуючи лише члени першого порядку ряду Тейлора відносно малих величин:

$$\tau_{ij} : z_i(t - \tau_{ij}) \approx z_i(t) - \tau_{ij} \dot{z}_i, \quad (\dot{z} \equiv dz/dt).$$

Відповідно до теореми Ельсгольца, членам вищого порядку притаманна гірша точність при розкладанні в ряд. Тому всі змінні в системі будуть апроксимуватися функціями лише однієї змінної часу  $t$ . Якщо розглянути задачу оптимального керування [29, 30] для динамічного нестійкого в часі об'єкта за даними критеріями, то можна подати Гамільтоніан системи (4) у вигляді

$$H(z, p) = \sum_{i=1}^M p_i z_i \sum_{j=0}^M b_{ij} z_j, \quad (5)$$

де  $z_0 = 1$ ,  $p_i$  у виразі (5) визначаються з системи рівнянь:

$$dp_i/dt = -(p_i \sum_{j=0}^M b_{ij} z_j + \sum_{j=1}^M p_j z_j b_{ji}). \quad (6)$$

Тоді проблема оптимального управління динамічного нестійкого в часі об'єкта полягає в обчисленні параметрів  $u_m(t)$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) на основі таких рівнянь:

$$dz_i/dt = f_i(z_1, \dots, z_M, u_1, \dots, u_M), \quad (7)$$

де  $u_i(t)$  в (7) можна вважати позитивними напрямними функціями дискретного часу (або  $b_{ij}(t)$  у (6), відповідно).

Функціональна якість (інтелект агентів  $F$ , визначений рівнянням (2)), може бути представлена як

$$F = \int_0^{\tau} f_0(z_i, u_m) dt \quad (8)$$

або

$$\dot{z}_0 = f_o(z_i, u_m), z_o(0) = 0. \quad (9)$$

Оптимальне ситуаційне управління, згідно з (8), (9), відбувається за значеннями  $u_m(t)$ , що задовольняють (8), (9) та умові  $H(z_i, p_i, u_m) = 0$ . Зауважимо, що принцип максимуму Понтрягіна дає лише необхідну, але не достатню умову для оптимального управління протягом ситуаційного управління системою. Тому можуть бути прийняті інші альтернативні рішення для вирішення проблеми або рішення може бути відсутнє взагалі.

## 5. Висновки

Розробка, прийняття та підтримка ефективних управлінських рішень відбувається на основі конкретних ситуаційних параметрів та показників керованої системи. Ситуаційне управління як технологія інформаційної та модельної підтримки прийняття рішень у процесі управління складними об'єктами забезпечує збір, обробку, зберігання, організацію доступу та інтерпретацію даних. Ця технологія спрямована на аналіз та прогнозування економічних, екологічних, соціальних та інших проблем, зокрема, розробку планів стратегічного розвитку на основі статистично узагальнених теоретичних та емпіричних підходів, виявлення, оцінку та застосування нових спроможностей керованої системи.

Підтримка функцій моделювання агентами агентно-орієнтованої системи дозволяє формувати адекватну поведінку у процесі ситуаційного управління в умовах змін оточуючого середовища. Розроблені моделі інтеграції поведінкових та координаційних аспектів агентів на основі знань можуть бути використані при розробці систем та технологій ситуаційного управління у різних сферах людської діяльності. Запропоновано модель для дослідження стійкості динамічної стохастичної системи на основі принципу стійкості за Ляпуновим, представлену у формі системи звичайних диференціальних рівнянь. Запропоновано та досліджено агентно-орієнтовний підхід для включення моделі стійкості за Ляпуновим у процес ситуаційного управління динамічною стохастичною системою як цільової проектної діяльності. Подальшого дослідження потребують аналіз властивостей різних інформаційних платформ та технологій для створення ефективних середовищ ситуаційного управління динамічними стохастичними системами, які функціонують на основі конвергентних агентів та забезпечують реалізацію принципу стійкості за Ляпуновим.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Weizsäcker von E.U., Wijkman A. C'mon! Don't Tell Me the Current Trends Are Sustainable!. In: *Come On!*. New York, NY: Springer, 2018. P. 1–61. DOI: 10.1007/978-1-4939-7419-1\_1.
2. Weizsäcker von E.U., Wijkman A. Come On! Join Us on an Exciting Journey Towards a Sustainable World!. *Come On!* New York, NY: Springer, 2018. P. 101–204. DOI: 10.1007/978-1-4939-7419-1\_3.
3. Глушков В.М. Макроэкономические модели и принципы построения ОГАС. М.: Статистика, 1975. 160 с.
4. Глушков В.М., Иванов В.В., Яненко В.М. Моделирование развивающихся систем. Москва: Наука, Физматлит, 1983. 351 с.

5. Triple Bottom Line. *The Economist*. 2009. November 17. URL: <https://www.economist.com/news/2009/11/17/triple-bottom-line>.
6. Коваленко О.Є. Застосування онтологій в системах ситуаційного управління. *Сучасні проблеми інформатики в управлінні, економіці, освіті та подоланні наслідків Чорнобильської катастрофи: матеріали XV Міжнар. наукового семінару* (Київ – оз. Світязь, 4–8 липня 2016 р.). К.: Національна академія управління, 2016. С. 84–89.
7. Jakobson G., Buford J., Lewis L. Situation Management: Basic Concepts and Approaches / V.V. Popovich, M. Schrenk, K.V. Korolenko (eds.). *Information Fusion and Geographic Information Systems, LNG&C*. 2007. Springer, Heidelberg. Vol. XIV. P. 18–33.
8. Yaneer B.-Y. General features of complex systems. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford, UK 1, 2002. 53 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/246294756\\_General\\_Features\\_of\\_Complex\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/246294756_General_Features_of_Complex_Systems).
9. Wooldridge M. *An Introduction to Multi-Agent Systems*. 2-nd edition. John Wiley and Sons, NY, 2009. 484 p.
10. Buford J.F., Jakobson G., Lewis L. Multi-Agent Situation Management for Supporting Large-Scale Disaster Relief Operations. *International Journal of Intelligent Control and Systems*. 2006. Vol. 11, N 4. P. 284–295.
11. Морозов А.А. Ситуационные центры – основа управления системами большой размерности. *Математические машины и системы*. 1997. № 2. С. 7–10.
12. Коваленко О.Є. Онтологія та модель трансформації інформації в ситуаційних агентних системах. *Електронне моделювання*. 2020. Т. 42, № 5. С. 3–23.
13. Kovalenko O.E. Knowledge Models for Organizational Maintenance of Situation Centers. *Proc. of 4th International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE-2014)* (October 24–25th, 2014). University of National and World Economy (UNWE). Sofia, Bulgaria, 2015. P. 241–248.
14. Nonaka I., Toyama R., Byosière P. A theory of organizational knowledge creation: Understanding the dynamic process of creating knowledge / M. Dierkes, A. Berthoin Antal, J.Child, I. Nonaka (eds.). *Handbook of organizational learning and knowledge*. New York: Oxford University Press, 2001. P. 491–516.
15. Reiter R. *Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems*. Cambridge, MIT Press, 2001. 446 p.
16. Kovalenko O.E. Models and means for service agents orchestration in situation management systems. *Actual Problems of Economics*. 2014. Vol. 154, Iss. 4. P. 462–467.
17. Prigogine I. Time, Structure and Fluctuations. *Nobel Lecture*. 8 December 1977. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/prigogine-lecture.pdf>.
18. Kosolapov V., Kovalenko O. Agent Based Modelling Support for Systems of Situational Management. *2018 IEEE 1st International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, SAIC 2018 – Proc.* (31 October 2018). Article number 8516818. DOI: 10.1109/SAIC.2018.8516818.
19. Rouche N., Habets P., Laloy M. *Stability Theory by Liapunov's Direct Method*. Springer-Verlag, N.Y., 1977. Vol. XII. 396 p.
20. Martyushev L., Seleznev V. Maximum entropy production principle in physics, chemistry and biology. *Phys. Rep.* 2006. Vol. 426, N 1. P. 1–45.
21. Shalizi C.R., Moore C. What Is a Macrostate? Subjective Observations and Objective Dynamics. URL: arXiv:cond-mat/0303625. 2003. URL: <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0303625.pdf>.
22. Verlinde, E. On the origin of gravity and the laws of Newton. *J. High Energ. Phys.* 2011. Iss. 4. P. 1–27. URL: [https://doi.org/10.1007/JHEP04\(2011\)029](https://doi.org/10.1007/JHEP04(2011)029).
23. Wissner-Gross A.D., Freer C.E. Causal entropic forces. *Phys. Rev. Lett.* 2013. Vol. 110, N 168702. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.168702.
24. Коваленко О.Є. Мультиагентна модель колективного прийняття рішень. *Актуальні проблеми економіки*. 2011. № 11. С. 279–285.
25. ISO/IEC/IEEE 16326:2009. *Systems and Software Engineering. Life Cycle Processes. Project Management*. 2019. December. URL: <https://www.iso.org/standard/75276.html>.
26. ISO 21500:2012. *Guidance on project management*. 2012. September. URL: <https://www.iso.org/standard/50003.html>.

27. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). Sixth ed. *Project Management Institute*. 2017. URL: <https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/foundational/pmbok/sixth-edition>
28. Эльсгольц Л.Э., Норкин С.Б. Введение в теорию дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом. М.: Наука, 1971. 296 с.
29. Allen P.M. Evolution, Population Dynamics and Stability. *Proc. of the National Academy of Sciences of the USA*. 1976. Vol. 73, N 3. P. 665–668.
30. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1961. 392 с.

*Стаття надійшла до редакції 28.05.2020*