

Д.І. СИМОНОВІнститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *denys.simonov@gmail.com*.**ІНТЕГРАЛЬНИЙ ЕНТРОПІЙНИЙ ІНДИКАТОР КЕРОВАНOSTІ
ЕВОЛЮЦІЇ СКЛАДНИХ СИСТЕМ**

Анотація. Запропоновано формалізований підхід до аналізу керованості еволюції складних мультиагентних систем на основі інтегрального ентропійного індикатора ризику втрати керованості. Побудовано багаторівневу модель динаміки мультиагентної системи, що поєднує мікродинаміку агентів, мезоструктурну організацію мережі взаємодій та макrorівневі інваріанти еволюції системи. На макrorівні введено інтегральний індикатор, сформований як композиція бар'єрних компонент, які відображають варіативність макродинаміки, ризик порушення інваріантності допустимої множини станів та втрату спектральної стійкості режиму. Така конструкція дає змогу кількісно оцінювати наближення системної траєкторії до межі втрати керованості. Прогностичні властивості індикатора досліджено у серії чисельних експериментів із використанням сценаріїв стабільної та критичної еволюції мультиагентної системи. Результати Монте-Карло валідації демонструють здатність запропонованого підходу виявляти передкритичні режими системної динаміки і розрізняти стабільні та нестійкі режими еволюції складних мультиагентних систем.

Ключові слова: інтегральний індикатор керованості еволюції, ентропія, мультиагентні системи, еволюція складних систем, макродинаміка, бар'єрні функції, раннє виявлення критичних станів.

DOI 10.34229/KCA2522-9664.26.4.12

ВСТУП

Складні мультиагентні системи лежать в основі багатьох сучасних соціально-економічних, технологічних та інформаційних процесів, зокрема цифрових платформ, транспортно-логістичних мереж, фінансових систем і розподілених інформаційних середовищ [1–3]. У таких системах велика кількість автономних агентів взаємодіє через динамічні мережеві зв'язки, що спричиняє формування колективної макродинаміки з нелінійними ефектами, стохастичними флуктуаціями та можливими переходами між різними режимами еволюції [4]. За цих умов важливою задачею є аналіз системної керованості та раннє виявлення наближення динаміки до нестійких або критичних станів [5].

Сучасні підходи до дослідження складних мережевих систем ґрунтуються на методах теорії складних мереж, стохастичного моделювання, теорії керування та агентного моделювання [6, 7]. Проте у більшості з них особливу увагу приділено або мікродинаміці взаємодії агентів, або окремим агрегованим характеристикам системи, що ускладнює інтегральний аналіз її еволюції. З огляду на викладене, перспективним є використання інформаційних та ентропійних характеристик для кількісного опису невизначеності та структурної нестійкості динаміки складних мультиагентних систем [8–10].

У цій роботі запропоновано формалізований підхід до аналізу керованості еволюції складної мультиагентної системи на основі інтегрального ентропійного індикатора, який поєднує мікродинаміку агентів, мезоструктурні властивості мережі та макродинамічні інваріанти системної еволюції і дає змогу виявляти наближення системи до передкритичних режимів.

МІКРОРІВЕНЬ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ

Нехай мультиагентна система в момент часу $t \in T$ задається мережею $G(t) = (I, E(t), W(t))$, де $I = \{1, \dots, N\}$ — множина агентів, $E(t) \subset I \times I$ — множина зв'язків, що визначає структуру безпосередньої взаємодії агентів, $W(t) = (w_{ij}(t))$ — матриця ваг взаємодії та інтенсивності впливу агентів.

© Д.І. Симонов, 2026