

УДК 004.94; 004.023

*Володимир Казимир, Аліна Посадська***ДОСЛІДЖЕННЯ КОГНІТИВНИХ КАРТ МЕТОДОМ ІМІТАЦІЙНОГО  
МОДЕЛЮВАННЯ***Владимир Казимир, Алина Посадская***ИССЛЕДОВАНИЕ КОГНИТИВНЫХ КАРТ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ***Volodymyr Kazymyr, Alina Posadska***RESEARCHING THE COGNITIVE MAPS BY SIMULATION MODELING**

*В статті представлено й обґрунтовано застосування підходу до дослідження когнітивних карт з метою прогнозування станів системи, що змінюються під впливом факторів, який базується на використанні розподіленої системи імітаційного моделювання. Надано формальне обґрунтування методу побудови імітаційних моделей нечітких когнітивних карт на основі E-мереж. Наведено приклад використання запропонованого підходу для прогнозування зміни станів екосистеми, у тому числі під впливом альтернативних управлінських рішень.*

**Ключові слова:** нечітка когнітивна карта, когнітивне моделювання, прогнозування поведінки системи, E-мережі, прийняття рішень.

*Рис.: 8. Табл.: 1. Бібл.: 11.*

*В статье представлено и обосновано применение подхода к исследованию когнитивных карт с целью прогнозирования состояний изменяющиеся под воздействием факторов системы, который основан на использовании распределенной системы имитационного моделирования. Предоставлено формальное обоснование метода построения имитационных моделей нечетких когнитивных карт на основе E-сетей. Приведен пример использования предложенного подхода для прогнозирования изменения состояний экосистемы, в том числе под влиянием альтернативных управленческих решений.*

**Ключевые слова:** нечеткая когнитивная карта, когнитивное моделирование, прогнозирование поведения системы, E-сети, принятие решений.

*Рис.: 8. Табл.: 1. Библ.: 11.*

*The application of the approach to the researching cognitive maps for the forecasting states that change under the influence of system factors, which is based on the use of a distributed system of simulation modeling, is presented and substantiated in the article. A formal substantiation of the method for building imitation models of fuzzy cognitive maps based on E-networks, is presented. An example of using the proposed approach for forecasting changes of ecosystem conditions, including under the influence of alternative management decisions, is given.*

**Key words:** fuzzy cognitive maps, cognitive modeling, forecasting the system behavior, E-nets, decision making.

*Fig.: 8. Tabl.: 1. Bibl.: 11.*

**Постановка проблеми.** Під час дослідження складних систем та процесів, що важко формалізуються, доцільно використовувати метод когнітивного моделювання. Застосовуючи цей метод для аналізу та прогнозування поведінки об'єкта дослідження, необхідно побудувати нечітку когнітивну карту та на її основі промоделювати різні сценарії розвитку подій. Такий прогноз, переважно, робиться за допомогою спеціально розроблених програмних засобів, які за своєю функціональністю та принципами організації позиціонуються між класичними системами імітаційного моделювання та експертними системами [1]. Однак можливості таких систем суттєво обмежені у плані створення моделей, їх верифікації та проведення модельних експериментів, а також відносно порівняння альтернатив під час прийняття рішень, які можуть бути оцінені з урахуванням можливих ризиків.

Водночас імітаційне моделювання є потужним засобом дослідження складних систем, що функціонують в умовах невизначеностей. За допомогою імітаційних моделей стає можливим проаналізувати та спрогнозувати поведінку системи у випадках, коли аналітичні методи не дають потрібного результату з причин обмежень щодо їх використання. Це може стосуватися як структурної складності систем, так і особливостей процесу їх функціонування, який в імітаційному експерименті відтворюється і досліджується з використанням методу Монте-Карло. Як правило, процес імітаційного моделювання передбачає послідовну побудову концептуальної, формалізованої та програмної моделі. При цьому концептуальна модель має принципове значення. Від того,

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

наскільки точно в концептуальній моделі враховані закономірності та особливості системи, що моделюється, залежить успіх у досягненні мети моделювання. Якщо дослідник володіє такою інформацією із самого початку, то можна впевнено рухатись по наступних етапах процесу моделювання.

Тому актуальною можна вважати задачу розробки програмних засобів, здатних повною мірою реалізувати можливості систем імітаційного моделювання для отримання статистичних оцінок кількісних характеристик систем, представлених на концептуальному рівні у вигляді когнітивних карт.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Використання методу когнітивного моделювання для аналізу слабоформалізованих систем описано в роботах таких учених, як Ф. Робертс, Дж. Каст, В. Б. Сілов, В. І. Максимов, Г. В. Горелова, О. П. Гожий, І. М. Вергунова та ін. [1–8]. У них сформульовані основні теоретичні принципи побудови когнітивних карт, у тому числі нечітких когнітивних карт, та надані чисельні приклади їх застосування в соціально-економічних, екологічних, політичних та інших предметних областях. Характерними рисами цих застосувань є зосередженість на обчисленні системних показників консонансу та дисонансу, які стосуються оцінки впливу факторів один на одного та впливу факторів на систему в цілому, в той час як питання прогнозування зміни станів факторів, тим більше в умовах невизначеності, висвітлені недостатньо. Однією з причин цього можна вважати обмеженість можливостей існуючих програмних засобів когнітивного аналізу в питаннях прогнозування станів системи в динаміці.

**Метою статті** є обґрунтування підходу до дослідження когнітивних карт з метою прогнозування станів системи, що змінюються під впливом факторів, який базується на застосуванні розподіленої системи імітаційного моделювання EMS – E-net Modeling System [9].

**Когнітивні карти та їх властивості.** Під когнітивною картою (КК) розуміють орієнтований граф, ребрам якого поставлені у відповідність деякі ваги. Вершинами цього графа є множина факторів (концептів), що визначають ситуацію, орієнтованими ребрами – причинно-наслідкові зв'язки між факторами [7]. КК не дають точного опису системи, що досліджується, а відображають тільки суб'єктивні оцінки експертів про закономірності, притаманні даній системі.

Спочатку як когнітивні карти використовували знакові графи [10], в яких ребра позначаються знаками «+» та «-», що відображають відповідно додатній та від'ємний зв'язок або характер впливу між факторами. Але згодом більш поширеним різновидом КК стали нечіткі когнітивні карти (НКК) [8], які дозволяють, крім загальних ознак впливу, ще й вказати рівень впевненості щодо оцінок впливу, представлений вагою дуг графа в інтервалі  $[-1, +1]$ . На рис. 1 і рис. 2 наведено приклади КК у загальному та нечіткому варіанті відповідно.

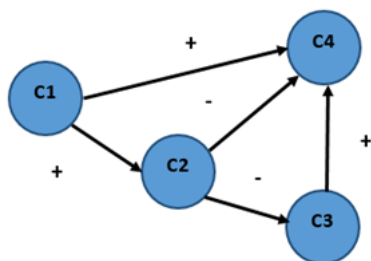


Рис. 1. Когнітивна карта

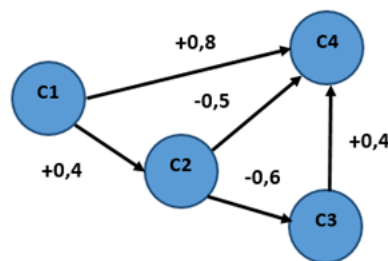


Рис. 2. Нечітка когнітивна карта

У процесі дослідження ситуацій за допомогою КК проводять статичний аналіз (оцінка впливу одних факторів на інші та стійкості ситуації загалом, пошук структурних змін для отримання стійких структур) або динамічний аналіз (генерація та аналіз можливих сценаріїв розвитку ситуації у часі, наслідків впливу на елементи системи або

зміни характеру зв'язків) [7]. Що ж стосується прогнозування зміни станів системи, що досліджується, то в послідовні моменти  $t, t + 1, \dots, t + N$ , знаходять значення векторів стану системи (ситуації)  $S(t), S(t + 1), \dots, S(t + N)$  (де значення моменту  $t$  – номер кроку моделювання). Оскільки функції впливу залежать не від значень вхідних факторів, а від їх приростів, то знаходять вектори станів ситуації  $S(1), \dots, S(N)$  та вектори приросту  $Pr(1), \dots, Pr(N)$  у послідовні дискретні моменти  $1, \dots, N$  при заданих початкових векторах стану  $S(0) = s_1^0, \dots, s_n^0$  і приростів факторів  $Pr(0) = (p_1(0), \dots, p_n(0))$ . Для цього використовується матричне співвідношення:

$$Pr(t + 1) = \sum Pr(t) \times U, \quad (1)$$

де  $U$  – множина дуг,  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ . Тобто приріст  $p_i(t + 1)$  – це сума добутків  $u_{ji} p_j(t)$  для змінної мережі системи  $v_i$ . Далі обчислюються прирости в послідовні моменти  $1, \dots, N$  та вектори станів ситуації:  $S(t + 1) = S(t) + Pr(t + 1)$ .

**Імітаційне моделювання НКК.** У процесі імітаційного моделювання НКК будемо розглядати вихідну НКК як концептуальну модель, яка є основою для подальшої формалізації. Для побудови формалізованої моделі пропонується використовувати керуючі Е-мережі (Control E-net, CEN) [11], які є найбільш потужним розширенням мереж Петрі. Формально CEN задаються множиною:

$$CEN = (P, T, F, V, U, M_0), \quad (2)$$

де  $P$  – множина позицій мережі;

$T$  – множина переходів  $T = \{T_T, T_F, T_J, T_X, T_Y\}$ ;

$F$  – функція інцидентності,  $F: P \times T \cup T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ ;

$V$  – множина змінних мережі;

$U = r, \sigma, \alpha, \tau, z$  – множина керуючих відображень, які визначають правила спрацювання переходів ( $r$  – вирішальна функція на X- та Y-переходах,  $\sigma$  – функція готовності,  $\alpha$  – функція активації,  $\tau$  – функція затримки,  $z$  – функція перетворення);

$M_0: P \rightarrow \{0, 1\}$  – функція початкового маркування, що задає присутність або відсутність позначок у позиціях.

Головна відмінність CEN від звичайних мереж Петрі полягає у використанні переходів п'яти типів (T-перехід – послідовні дії, F-перехід – розгалуження шляхів, J-перехід – злиття шляхів, X-перехід – перемикач між альтернативними шляхами, Y-перехід – вибір при злитті альтернативних шляхів дій), можливості виконання обчислювальних операцій із атрибутами міток, що переміщуються по мережі, та використанні набору змінних мережі, доступних для функцій переходів та міток.

Розглянемо семантику CEN як формальної основи для моделювання НКК. Під станом  $S(t)$  в CEN будемо розуміти вектор значень змінних мережі  $V(t) = (v_1(t), v_2(t), \dots, v_n(t))$ . Кожна із змінних  $v_i(t) \in V(t), i = \overline{1, n}$  буде відображати значення  $i$ -го фактору в момент часу  $t$ . Оскільки всі дії у Е-мережі відбуваються тільки при спрацюванні певних переходів, то можна вважати, що зміна маркування позицій, яка створює умови для цього, буде впливати на зміну стану мережі. Тоді відображення:

$$M(t): V(t) \rightarrow S(t), \quad (3)$$

де  $M(t)$  – маркування позицій в момент часу  $t$  фактично реалізує процес зміни станів НКК, представлену у вигляді CEN.

Тоді загальну формалізовану модель НКК з урахуванням приростів факторів можна записати як:

$$FM = (CEN, Pr(t)) \quad (4)$$

Під час модельного експерименту мітки будуть просуватися по мережі відповідно до правил спрацювання переходів, відтворюючи процес зміни станів факторів у часі.

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Нечіткий характер впливів факторів враховується у функціях перетворення переходів. До того ж, функція часової затримки може бути використана для врахування часових властивостей взаємодії факторів.

Формалізована модель у вигляді СЕН для НКК, наведеній на рис. 2, представлена на рис. 3.

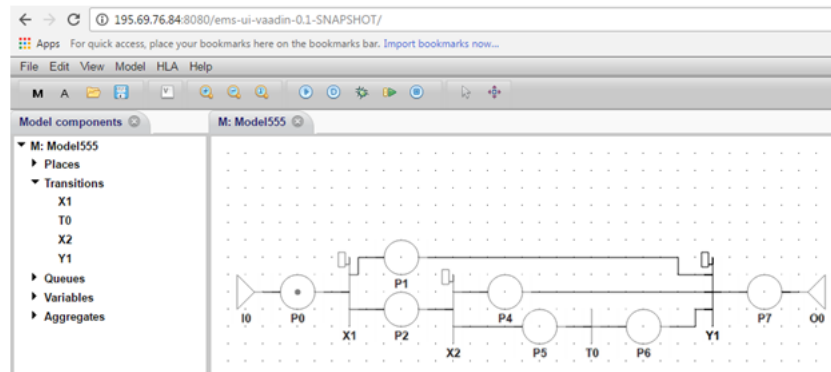


Рис. 3. Формалізована модель НКК, побудована за допомогою СЕН

Дана формалізована модель побудована у системі імітаційного моделювання EMS, яка базується на використанні математичного апарату СЕН. Графічний інтерфейс EMS підтримує процес побудови моделі і забезпечує автоматичне створення програмної моделі для проведення експериментів із нею. У цій моделі дугам відповідають переходи, а позиціям – фактори впливу.

Щоб відобразити можливість альтернативного вибору під час здійснення впливу, який може стосуватися розміру приросту чи навіть його знаку, додатково на шляху впливу може бути поставлений агрегат (окрема модель), схема якого наведена на рис. 4.

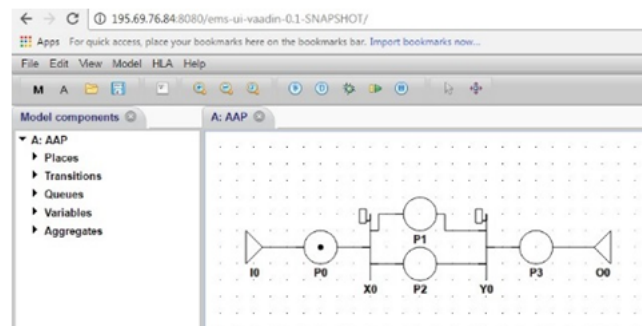


Рис. 4. Агрегат альтернативного вибору

**Приклад застосування запропонованого підходу.** Розглянемо задачу по зменшенню забруднення водних ресурсів екосистеми, яка описана в [6]. У цій задачі екосистема представляється у вигляді НКК, що представлена на рис. 5. Як фактори впливу розглядаються:

- K1 – забруднення водних ресурсів;
- K2 – промислові відходи (стоки);
- K3 – старіння очисних споруд;
- K4 – техногенні аварії;
- K5 – нові технології очищення;
- K6 – вартість нових очисних споруд;
- K7 – зростання населення;
- K8 – стан навколишнього середовища.

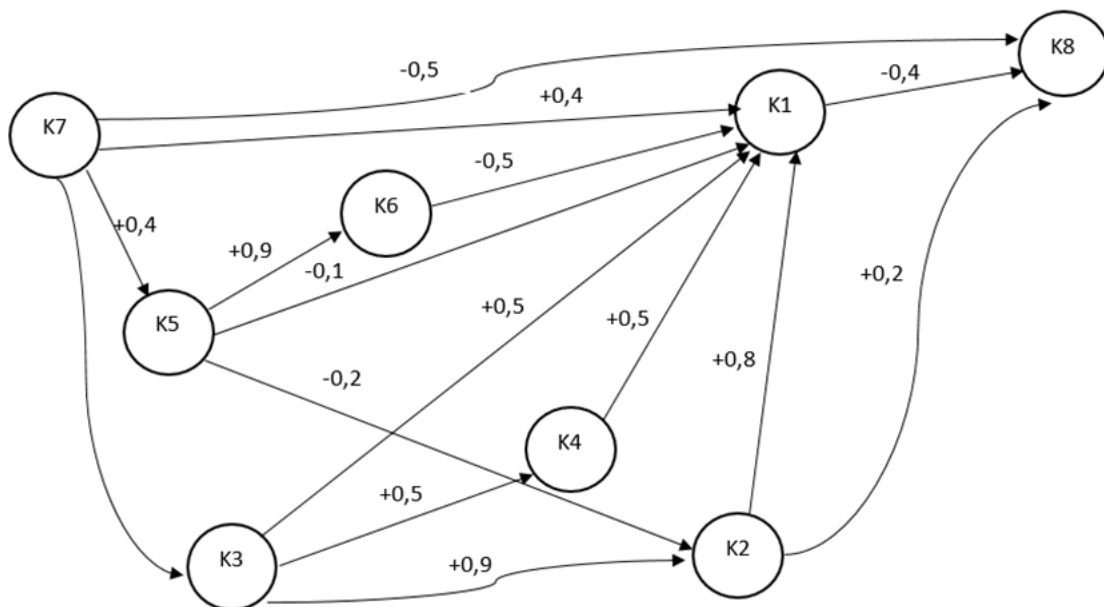


Рис. 5. Концептуальна модель екосистеми

Програмна модель наведеної НКК, побудована в системі EMS, має вигляд, представлений на рис. 6.

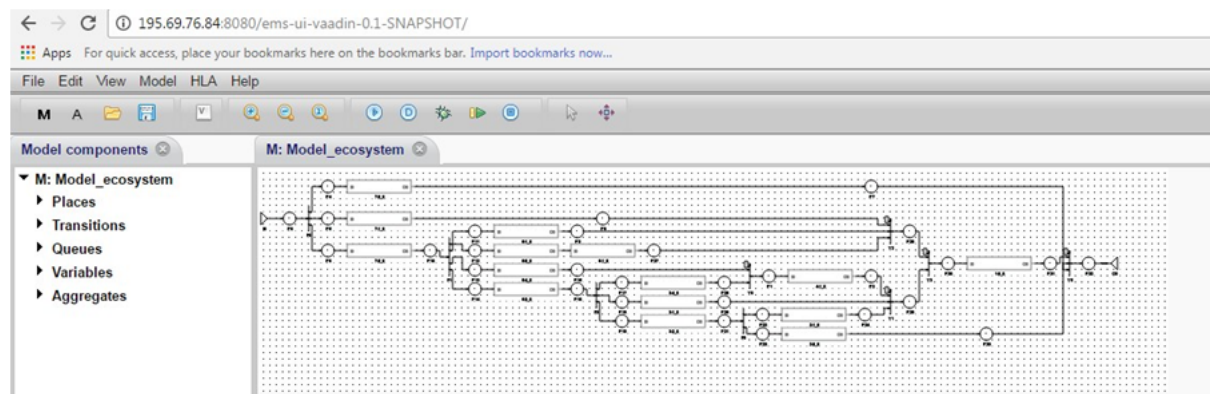


Рис. 6. Програмна модель екосистеми

Розроблена імітаційна модель включає агрегати, кожен з яких моделює вибір альтернативного шляху зміни впливу кожного фактора.

Так як головна мета - зменшення рівня забруднення екосистеми, то далі необхідно дослідити зміну значень основних параметрів на певних відрізках часу поетапно. По аналогії з [6], був задіяний план по зменшенню рівня забруднення водних ресурсів, наведений в таблиці.

Таблиця

План по зменшенню рівня забруднення водних ресурсів

№ етапу	Заходи	Значення концептів
1 етап – 3 місяці	Зменшення рівня промислових стоків, впровадження нових технологій очищення	Зменшення K2 Збільшення K5
2 етап – 6 місяців	Зменшення рівня промислових стоків та зниження старіння очисних споруд, впровадження нових технологій очищення	Зменшення K2, K3 Збільшення K5
3 етап – 6 місяців	Зменшення рівня промислових стоків, впровадження нових технологій очищення та зростання населення	Зменшення K2 Збільшення K5, K7

Приріст впливу кожного фактору задається нормальним законом розподілення із математичним очікуванням 0,1 та середнім квадратичним відхиленням 0,01. Як альтернативи розглядалися зміни впливу кожного фактору з приростом 0,05.

На рис. 7 і рис. 8 представлено результати моделювання зміни станів екосистеми для основного та альтернативного варіантів приросту факторів.

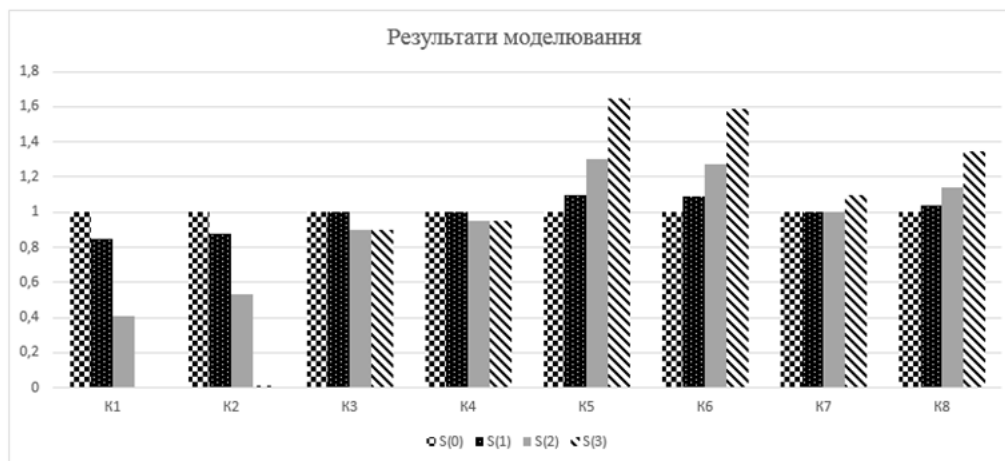


Рис. 7. Результати моделювання зміни станів екосистеми

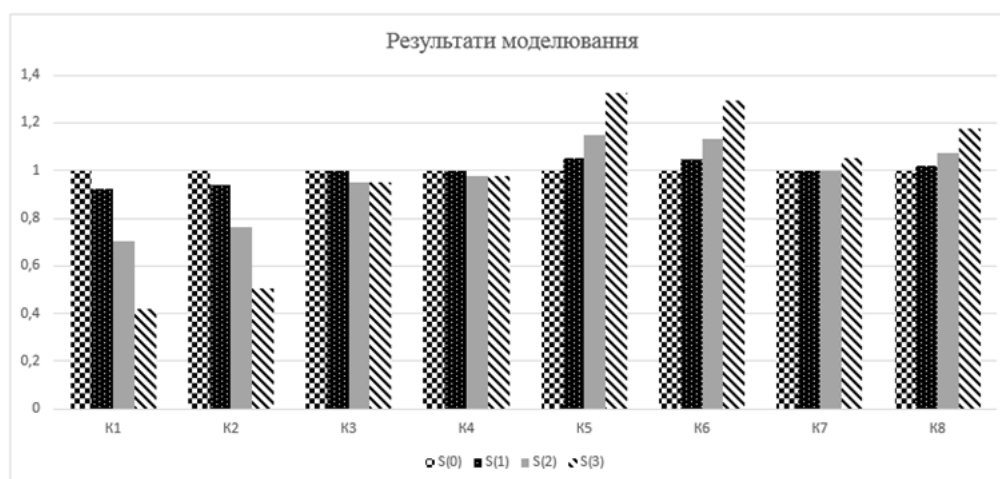


Рис. 8. Альтернатива зміни впливу факторів

Виходячи з представлених результатів моделювання, можна зробити висновок, що екосистема приходить до задовільного стану вже на третьому часовому етапі, однак для альтернативних рішень тенденція зниження рівня забруднення уповільнюється більше ніж у два рази.

**Висновки.** Задіяна в запропонованому підході інформаційна технологія, що базується на використанні формального апарату керуючих Е-мереж, забезпечує переведення процесу дослідження когнітивних карт від аналітично-розрахункового порівняння до статистичного оцінювання параметрів системи. Завдяки цьому спрощується процедура побудови імітаційних моделей та закладається можливість не тільки прогнозувати динаміку зміни факторів у часі, в тому числі з урахуванням невизначеностей щодо планових показників, але й оцінювати різні варіанти розвитку ситуацій для альтернативних управлінських рішень.

#### Список використаних джерел

1. Кулинич А. А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы / А. А. Кулинич // Пробл. управл. – 2010. – № 3. – С. 2–16.

2. Силов Б. В. Принятие стратегических решений в нечёткой обстановке / Б. В. Силов. – М. : ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.
3. Авдеева З. К. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) / З. К. Авдеева, С. В. Коврига, Д. И. Макаренко // UBS. – 2007. – Issue 16. – С. 26–39.
4. Горелова Г. В. Имитационное моделирование вариантов резервирования в распределенных информационно-управляющих системах с децентрализованной организацией / Г. В. Горелова, Э. В. Мельник // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 184–193.
5. Когнитивные технологии для поддержки принятия управленческих решений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.iis.ru/events/19981130/maximov.ru.html>.
6. Гожий О. П. Побудова динамічних моделей на основі нечітких когнітивних карт для вирішення задач сценарного планування / О. П. Гожий // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. – 2013. – № 7. – С. 13–17.
7. Вергунова І. М. Системне моделювання в економіці (блок 2) (для студентів за напрямом підготовки 8.04030203 – соціальна інформатика) / І. М. Вергунова. – К. : ФОП Корзун Д. Ю. 2013. – 106 с.
8. Когнитивные карты с интерпретацией концептов и связей между ними совокупностью аргументов двузначной логики / А. И. Каяшев, М. И. Шарипов, Е. А. Муравьёва, К. А. Багров // В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 4126–4131.
9. Казимир В. В. Розподілена система імітаційного моделювання EMS / В. В. Казимир, Г. А. Сіра, І. І. Мушкетик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2011. – № 3. – С. 144–153.
10. Робертс Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к биологическим и экологическим задачам / Ф. С. Робертс. – М. : Наука, 1986. – 496 с.
11. Казимир В. В. Динамічна оцінка ризику виконання плану робіт методом імітаційного моделювання / В. В. Казимир, А. С. Посадська // Технічні науки і технології : науковий журнал. – 2016. – № 3(5). – С. 113–122.

### References

1. Kulinich, A.A. (2010). Komp'yuternye sistemy modelirovaniya kognitivnykh kart: podhody i metody [Computer systems for modeling cognitive maps: approaches and methods]. *Probl. upravl. - Management issues, Moskva*, № 3, pp. 2–16 (in Russian).
2. Silov, B.V. (1995). Prinjatие strategicheskikh reshenij v nechëtkoj obstanovke [Making strategic decisions in an unfavorable environment]. *M.: INPRO-RES*, 228 p. (in Russian).
3. Avdeeva, Z.K., Kovriga, S.V., Makarenko, D.I. (2007). Kognitivnoe modelirovanie dlja reshenija zadach upravlenija slabostrukturirovannymi sistemami (situacijami) [Cognitive modeling for solving problems of managing badly structured systems (situations)]. *UBS*, Issue 16, pp. 26–39 (in Russian).
4. Gorelova, G.V., Mel'nik, Je.V. (2013). Imitacionnoe modelirovanie variantov rezervirovaniya v raspredelennyh informacionno-upravljajushhijh sistemah s decentralizovannoj organizaciej [Simulation modeling of backup options in distributed information-control systems with a decentralized organization]. *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki - News of SFedU. Technical sciences*, № 3 (140), pp.184-193 (in Russian).
5. Kognitivnye tehnologii dlja podderzhki prinjatija upravlencheskich reshenij [Cognitive technologies to support management decision-making] (2017). Retrieved from: <http://www.iis.ru/events/19981130/maximov.ru.html>.
6. Hozhyi, O.P. (2013). Pobudova dynamichnykh modelei na osnovi nechitkykh kognitivnykh kart dlja vyrishennja zadach stsenarnoho planuvannja [Dynamic modeling based on fuzzy cognitive maps for solving problems scenario planning]. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti - Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, № 7, pp. 13-17 (in Ukrainian).
7. Verhunova, I.M. (2013). Systemne modeliuвання v ekonomitsi (blok 2) (dlia studentiv za napriamom pidhotovky 8.04030203 – sotsialna informatyka) [System modeling in the economy (Block 2) (for students in the direction of 8.04030203 - Social Informatics)]. *K., FOP Korzun D.Iu*, 106 p. (in Ukrainian).

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

8. Kajashev, A.I., Sharipov, M.I., Murav'jova, E.A., Bagrov, K.A. (2014). Kognitivnye karty s interpretaciej konceptov i svjazej mezhdju nimi sovokupnost'ju argumentov dvuznachnoj logiki [Cognitive maps with interpretation of concepts and connections between them by a set of arguments of two-valued logic]. *V sbornike: XII vserossijskoe soveshhanie po problemam upravlenija vspu - In the collection: XII All-Russian meeting on problems of control of flap*, Institut problem upravlenija im. V.A. Trapeznikova RAN, pp. 4126-4131 (in Russian).
9. Kazymyr, V.V., Sira, H.A., Mushketyk, I.I. (2011). Rozpodilena systema imitatsiynoho modelyuvannya EMS [Distributed simulation system EMS]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu - Visnyk of Chernihiv State Technological University*, no.3, pp. 144 – 153 (in Ukrainian).
10. Roberts, F.S. (1986). Diskretnye matematicheskie modeli s prilozhenijami k biologicheskim i jekologicheskim zadacham [Discrete mathematical models with applications to biological and ecological problems]. *M.: Nauka*, 496 p. (in Russian).
11. Kazymyr, V.V., Posadska, A.S. (2016). Dynamichna otsinka ryzyku vykonannya planu robit metodom imitatsiynoho modeliuвання [Dynamic risk assessment of the work plan implementation by simulation modeling]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohii: naukovyi zhurnal - Technical sciences and Technologies*, Chernih.nats.tekhnol.un-t, Chernihiv, № 3(5), pp. 113-122 (in Ukrainian).

**Казимир Володимир Вікторович** - доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Казимир Владимир Викторович** - доктор технических наук, профессор, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Kazymyr Volodymyr** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** vvkazymyr@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0001-8163-1119>

**Scopus Author ID:** 56644727300

**Посадська Аліна Сергіївна** – асистент кафедри інформаційних систем в економіці, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

**Посадская Алина Сергеевна** – ассистент кафедры информационных систем в экономике, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

**Posadska Alina** – assistant of the Department of Information Systems in the Economy, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

**E-mail:** alinka.posadskaya@gmail.com

**ORCID ID:** <http://orcid.org/0000-0001-6155-5913>