

УДК 004.94

С.В. ГОЛУБ*, С.Ю. КУНИЦЬКА*

ПОБУДОВА ЕШЕЛОНІВ У ПОЛІАГЕНТНИХ ФУНКЦІОНАЛАХ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАХВОРЮВАНЬ НА COVID-19 В УКРАЇНІ

*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

Анотація. Новий метод формування ешелонів у структурі поліагентних функціоналів моніторингових інформаційних систем досліджується у процесі розв'язання задачі прогнозування захворюваності населення України на COVID-19. Поліагентний функціонал – це надагентна ешелонована структура, яка будується моніторинговою інформаційною системою в умовах зниження інформативності результатів спостереження. Ешелони цього функціонала утворюються з моніторингових агентів. Кожен агент має індивідуальне завдання. Для його виконання агент обробляє результати спостережень, видобуває з них відомості про закономірності поведінки об'єкта при зміні зовнішнього середовища. Здобуті відомості містяться у базі модельних знань агента у формі ієрархічного поєднання моделей, побудованих агентним синтезатором. Кожна модель є розв'язком однієї з задач ідентифікації, групування, прогнозування та інших. Перелік задач, які треба розв'язати для побудови бази модельних знань агента, формується відповідно до агентного завдання на основі масиву вхідних даних. У роботі вперше запропоновано формувати ешелони поліагентних функціоналів із агентів, що ідентифікують функціональну залежність кожного показника, за яким проводились спостереження від інших показників масиву вхідних даних. Масив результатів спостережень розгортається у кілька масивів для побудови кожного моніторингового агента за правилом «Кожен від інших». Далі агенти поєднуються в ешелони, утворюючи структуру поліагентного функціонала. Поліагентні функціонали будуються для підвищення різноманітності процесів обробки результатів спостережень та видобування знань про закономірності поведінки об'єктів моніторингу у випадку зниження інформативності результатів спостережень. Здатність будувати агентні функціонали з'являється у моніторинговій інформаційній системі у результаті застосування агентного підходу до процесу реалізації інформаційної технології інтелектуального моніторингу.

Ключові слова: інтелектуальний моніторинг, агентний функціонал, ешелон.

Abstract. A new method of forming echelons in the structure of multi-agent functionals of monitoring information systems is investigated in the process of solving the problem of predicting the incidence of COVID-19 in Ukraine. A multi-agent functional is an over-agent echelon-like structure built by a monitoring information system under conditions of a decrease in the information content of observation results. Echelons of this functional are formed from monitoring agents. Each agent has an individual task. To execute it, the agent processes the results of observations, extracts from them information about the patterns of behavior of the object when the external environment changes. The obtained information is contained in a model knowledge base of the agent in the form of a hierarchical combination of models built by the agent-based synthesizer. Each model is a solution to one of the problems of identification, grouping, forecasting, etc. The list of tasks that have to be solved in order to build the model knowledge base of the agent is formed in accordance with the agent-based task based on an array of input data. For the first time, it is proposed to form echelons of multi-agent functionals from the agents that identify the functional dependence of each indicator monitored from other indicators of the input data array. The array of observation results is expanded into several arrays in order to build each monitoring agent according to the «each one from the others» rule. After that the agents are combined into echelons thus forming the structure of the multi-agent functional. Multi-agent functionals are constructed with the aim of increasing the variety of processes for processing observation results and extracting knowledge about

the patterns of behavior of monitoring objects in the case of a decrease in the information content of these observation results. The ability to build agent-based functionals appears in the monitoring information system as a result of the application of the agent-based approach to the implementation of intelligent monitoring information technology.

Keywords: intelligent monitoring, agent-based functional, echelon.

DOI: 10.34121 / 1028-9763-2021-2-45-51

1. Вступ

Прогнозування залишається одним із найбільш актуальних завдань моніторингу. Від інших моніторингових завдань прогнозування відрізняється способом інтерпретації результатів, наявністю характеристик часу у первинному описі та порядком формування історичних даних. Точки спостереження розміщуються послідовно, спостереження проводяться через дискретні проміжки часу і задають тривалість кроку прогнозування. Метою прогнозування є формування науково обґрунтованих висновків [1] про майбутній стан об'єкта моніторингу. Відповідно до теми цієї роботи, об'єктом моніторингу є стан здоров'я населення України. Прогнозований показник стану – кількість захворювань на COVID-19.

Поліагентні функціонали (ПАФ) є структурними елементами моніторингової інформаційної системи (МІС), яка призначена для розв'язання задач прогнозування, групування, ідентифікації та інших завдань відповідно до особи, що приймає рішення. ПАФ призначені для підвищення потужності синтезаторів моделей в умовах зниження інформативності масиву результатів спостережень [2].

На сьогодні дані про захворювання населення країн світу на COVID-19 є зашумленими, слабо інформативними. Опубліковані дані не дозволяють сформувати інформативний масив результатів спостережень як одну із таблиць бази даних (БД) МІС. Ситуація схожа із зниженням інформативності БД моніторингової системи в результаті кризової зміни властивостей об'єкта спостереження. Нами запропоновано використати нову методологію створення МІС на основі агентних функціоналів для прогнозування на тиждень вперед кількості захворювань населення України на COVID-19. Робота містить опис нового методу формування ешелонів прогнозних поліагентних функціоналів та експериментальне підтвердження факту підвищення різноманітності МІС після побудови ПАФ.

2. Огляд існуючих методів та засобів підвищення різноманітності засобів прогнозування

Значна кількість завдань із прогнозування вирішується агентами на основі імітаційних методів моделювання [3]. Використання імітаційних методів у технологіях моніторингу вимагає додаткових досліджень, які лежать поза межами цієї роботи.

Для розв'язання задач прогнозування найчастіше використовується метод екстраполяції [4]. В умовах, при яких МІС починає будувати агентні функціонали, використання методів екстраполяції ускладнене, оскільки властивості об'єкта моніторингу змінюються, і застосування закономірностей зміни прогнозованої ознаки, виявленої в минулому, не може бути застосоване без модифікації для передбачення її значення у майбутньому. У процесі побудови моніторингових агентів експертні методи прогнозування можуть бути використані як допоміжні при початкових налаштуваннях. Вони не можуть бути основою процесів автономної побудови агентом прогнозної бази модельних знань. Тому у цій роботі перевага надавалась методам еволюційного, індуктивного та нейромережевого синтезу прогнозних моделей.

В умовах, коли зміна властивостей об'єкта моніторингу призводить до зниження інформативності масиву результатів спостереження, для підвищення різноманітності методів побудови прогнозних моделей перспективним є багатосаровий підхід [5] у різноманітних його інтерпретаціях. В [6] описано процес багатосарової побудови прогнозної мо-

делі. Перший шар утворюють кластеризаційні моделі. Другий шар утворюють моделі, які є розв'язком задачі прогнозування для кожного кластера даних. У [7] пропонується перший шар будувати з кількох прогнозних моделей-предикторів. Другий шар утворює модель, яка поєднує результати прогнозування моделей попереднього шару і формує результат прогнозування. У [8] описаний консенсус-прогноз, який також пропонує будувати прогнозну модель із двошаровою структурою. Перший шар утворюється кількома прогнозними моделями, на другому шарі відбувається комбінування вихідних сигналів моделей попереднього шару.

Використання множини генерованих агентів із завданнями розрахунку параметрів прогнозної моделі описується у [9].

Значна кількість робіт містить описи процесів використання нейромереж у процесі розв'язку задачі прогнозування [10]. Ці задачі розв'язуються як на основі часових рядів [11], так і часових перетинів із врахуванням не тільки часу, але й інших зовнішніх факторів [12]. Процедури прогнозування можуть бути типізовані і успішно використані для побудови баз модельних знань моніторингових агентів.

Для використання кожного з описаних методів прогнозування критично важливим є інформативність історичних даних. Взаємодія агентів у мультиагентних системах прогнозування відбувається у межах одного ешелону. Методів щодо підвищення потужності засобів синтезу моделей надагентними багатошаровими структурами як їх реакцію на зміну стану об'єктів моніторингу виявити не вдалось.

3. Нерозв'язані задачі та мета роботи

Нерозв'язаною залишається задача прогнозування в умовах зниження інформативності історичних даних. Властивості об'єкта моніторингу, які відображені у структурі прогнозного агента, з часом змінюються. У кризових умовах об'єкти переходять в інші стани за короткий проміжок часу, погіршуючи характеристики прогнозних моделей. У цих обставинах прогнозні завдання агентів із базами модельних знань, сформованих за багатошаровими методами, залишаються не виконаними. Контролери виводять агенти із використання, і МІС стає нездатною виконувати ці моніторингові завдання.

Тому *метою цієї роботи* є дослідження нових процесів формування агентних функціоналів при розв'язанні задач прогнозування.

4. Формалізація завдання

Прогнозним завданням моніторингу за заданим об'єктом є розрахунок прогнозу значення захворюваності на COVID-19 в Україні під впливом зміни захворюваності в інших країнах.

Відомі значення захворюваності населення у країнах, зафіксовані кожного дня впродовж 2020 року:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (1)$$

де x_1 – захворюваність населення України, n – кількість країн, захворюваність яких впливає на об'єкт моніторингу у дискретні моменти часу, подані у табл. 1:

$$T = \{t, t_{-1}, t_{-2}, \dots, t_{-m}\}, \quad (2)$$

де m – кількість точок спостереження.

Моніторингова інформаційна система містить множину агентів із прогнозними моніторинговими завданнями:

$$F = \{F_{x1}, F_{x2}, F_{x3}, \dots, F_{xm}\}, \quad (3)$$

де n – кількість агентів із прогностичними моніторинговими завданнями.

Необхідно побудувати прогностичну модель:

$$Z_1 = f(T, X, F, t_{+7}), \quad (4)$$

де Z_{x1} – вихідний сигнал агентного функціонала з моніторинговим завданням прогнозу кількості захворювань населення України, t_{+7} – горизонт прогнозування (7 кроків), для якого відхилення результатів прогнозування від дійсних значень набуває мінімального значення.

Модель повинна відображати функціональну залежність захворюваності в Україні на 7-й день із моменту останнього спостереження від часу та захворюваності населення інших країн, перелічених у табл. 1.

Таблиця 1 – Ознаки первинного опису світових захворювань на COVID-19

Показники	Коментарі
1) час спостереження; 2) захворюваність в Україні; 3) захворюваність у Франції; 4) захворюваність у Білорусі; 5) захворюваність у Грузії; 6) захворюваність у Німеччині; 7) захворюваність у Ізраїлі; 8) захворюваність в Італії; 9) захворюваність у Молдові; 10) захворюваність у Словаччині; 11) захворюваність у Словенії; 12) захворюваність у Росії; 13) захворюваність у Португалії; 14) захворюваність у Польщі; 15) захворюваність у Румунії; 16) захворюваність в Іспанії; 17) захворюваність у Туреччині; 18) захворюваність в Єгипті; 19) захворюваність у Греції; 20) захворюваність у США; 21) захворюваність у Китаї; 22) захворюваність в Англії	Результати щоденних спостережень, отримані впродовж 2020 року

5. Підходи та гіпотези, що використовуються в роботі

Була висунута гіпотеза 1 про ефективність формування ешелонів агентного функціонала ПАФ шляхом розгортання його елементів із одного масиву вхідних даних — побудови агентів із локальними завданнями прогнозування показників масиву вхідних даних за принципом «Кожен від усіх».

Для організації спостережень та формування первинного опису об'єкта моніторингу була сформульована гіпотеза 2 про те, що рівень захворюваності населення України залежить від кількості захворювань населення інших країн, перш за все сусідніх та країн, які є традиційними туристичними об'єктами. Тому для розв'язання задачі прогнозування захворюваності в Україні доцільно будувати первинний опис об'єкта моніторингу у формі часового перетину із врахуванням захворюваності в інших країнах.

Наперед відомо, що історичні дані містять інтегральні характеристики захворюваності населення у країні в цілому без урахування особливостей регіонів. Крім того, рівень захворюваності залежить не тільки від зовнішніх контактів населення України, а і від внутрішньої міграції, стану системи охорони здоров'я у державі, стану майже зруйнованої системи санітарно-епідеміологічного захисту населення, погодних умов та інших факторів, які можуть бути не встановлені. Тому передбачається, що інформативність масиву спостережень буде недостатньою для побудови агентів із прогностичними завданнями моніторингу і виникне потреба у формуванні агентного функціонала.

6. Експериментальна перевірка гіпотез

Для перевірки висунутих гіпотез проводився модельний експеримент. Досліджувалась залежність кількості захворювань на COVID-19 в Україні через 7 днів від кількості захворювань на цю хворобу в інших країнах. Як джерело спостережень використані дані, викладені у [13]. З одного масиву даних будувались кілька агентів із завданням прогнозування захворюваності населення різних країн. Сигнали з виходу агентів додавались у первинний опис для прогнозування захворюваності в Україні.

У табл. 1 подано перелік ознак, які використовувались для формування первинного опису моніторингових агентів із перетворення даних.

Для виконання завдань прогнозування захворюваності населення на 7-й день спостережень у кожній із країн, представлених у табл. 1, будувались моніторингові агенти із прогнозним завданням за правилом «Кожен від усіх». Процес побудови агентів описаний у [14]

За значеннями показників табл. 1 формувалась масив вхідних даних, які використовувались у процесі синтезу агентних моделей. Використовувалась множина агентів, які містять синтезатори, профільовані індуктивними алгоритмами МГУА [15], нейромережами на основі бінарного і багатозарового перцептрона [16] та радіальних базисних функцій [17] різних топологій, гібридними алгоритмами синтезу моделей [18].

Як характеристики АМ використовувалась середня відносна похибка результатів моделювання відповідно до завдання моніторингу на тестовій послідовності точок спостереження. Ці точки спостереження не використовувались у процесі побудови моделей. Тестова послідовність містила результати 10-ти останніх спостережень МВД для кожного агента чи ПАФ.

У табл. 2 подані характеристики агентних моделей.

Таблиця 2 – Характеристики агентних моделей

№ з/п	Завдання моніторингу	Агентна модель	Середня похибка результатів моделювання, %
1	Прогнозування захворюваності в Україні на 7-й день	y_1	6,49
2	Прогнозування захворюваності у Франції на 7-й день	y_2	4,43
3	Прогнозування захворюваності у Білорусі на 7-й день	y_3	13,81
4	Прогнозування захворюваності у Грузії на 7-й день	y_4	114,8
5	Прогнозування захворюваності у Германії на 7-й день	y_5	5,50
6	Прогнозування захворюваності у Ізраїлі на 7-й день	y_6	69,94
7	Прогнозування захворюваності в Італії на 7-й день	y_7	3,56
8	Прогнозування захворюваності у Молдові на 7-й день	y_8	7,66
9	Прогнозування захворюваності у Словаччині на 7-й день	y_9	101,38
10	Прогнозування захворюваності у Словенії на 7-й день	y_{10}	197,22
11	Прогнозування захворюваності у Росії на 7-й день	y_{11}	14,18
12	Прогнозування захворюваності у Польщі на 7-й день	y_{12}	1,94
13	Прогнозування захворюваності у Португалії на 7-й день	y_{13}	2,94
14	Прогнозування захворюваності у Румунії на 7-й день	y_{14}	2,94
15	Прогнозування захворюваності в Іспанії на 7-й день	y_{15}	8,80
16	Прогнозування захворюваності у Туреччині на 7-й день	y_{16}	4,7
17	Прогнозування захворюваності в Єгипті на 7-й день	y_{17}	91,68
18	Прогнозування захворюваності у Греції на 7-й день	y_{18}	48,90
19	Прогнозування захворюваності у США на 7-й день	y_{19}	145,80

Продовж. табл. 2

20	Прогнозування захворюваності у Китаї на 7-й день	y_{20}	99,98
21	Прогнозування захворюваності в Англії на 7-й день	y_{21}	2225,34
22	Прогнозування захворюваності у Канаді на 7-й день	y_{22}	27,00

Не для кожного з завдань вдалось побудувати моніторингову агентну модель (МAM) і, відповідно, моніторинговий агент (МА). За результатами, поданими у табл. 2, вважається, що агенти $u_4, u_6, u_9, u_{10}, u_{17}, u_{18}, u_{19}, u_{20}, u_{21}$ побудувати не вдалось. Це пов'язано з недостатньою різноманітністю агентних синтезаторів моделей і може бути викликано зашумленістю даних або домінуючим впливом факторів, які не представлені в табл. 1.

Оскільки перелічені агенти побудувати не вдалось, то при формуванні агентного функціонала вони не використовувались. АФ будувався за участю вихідних сигналів агентів $u_2, u_3, u_5, u_7, u_8, u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}, u_{22}$. Оскільки АМ використовували сумісні МВД, будувався поліагентний функціонал [19].

На рис. 1 подані відносні похибки моделювання кількості захворювань в Україні агента та поліагентного функціонала, отримані на всій послідовності точок спостереження МВД.

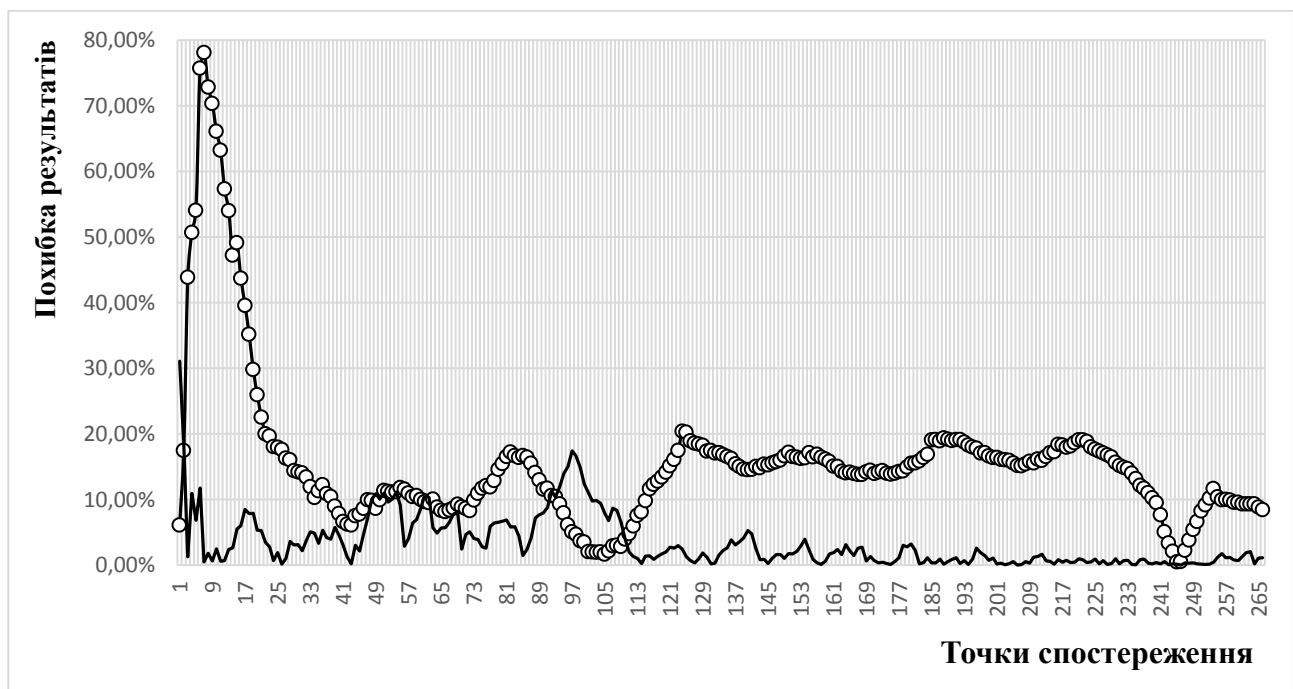


Рисунок 1 – Характеристика точності вихідних сигналів на точках МВД: о – похибка сигналу на виході агента u_1 ; — – похибка сигналу на виході ПАФ

Вихідні сигнали агентів та поліагентних функціоналів порівнювались за середнім значенням відносної похибки результатів моделювання, розрахованою на тестовій послідовності точок спостереження. Вихідний сигнал поліагентного функціонала мав значення середньої похибки на 34,78% менше за цю ж характеристику вихідного сигналу кращого агента і набуло значення 6,15%.

Таким чином, побудова агентного функціонала шляхом побудови додаткових агентів забезпечила підвищення точності прогнозування захворюваності населення України з упередженням 7 днів.

7. Висновки

Формування агентних завдань з ідентифікації зв'язків між характеристиками об'єкта спостережень, які утворюють масив вхідних даних, дозволяє будувати моніторингові агенти та утворювати із них шари у структурі поліагентного функціонала. Моніторингове завдання прогнозування захворюваності населення України на COVID-19 із горизонтом прогнозування 7 днів не може бути виконане одним агентом на основі результатів спостережень за динамікою захворюваності населення інших країн. Побудова поліагентного функціонала із агентів, що створювались для прогнозування захворюваності населення інших країн, дозволяє знизити похибку прогнозування на 34,78%, досягнувши її значення 6,15%.

Отриманий новий метод формування шарів у структурі поліагентного функціонала. Моніторингова інформаційна система отримала ще один метод функціонування впродовж часу, коли нове завдання МІС отримала, а результатів спостережень відповідно до цього завдання ще немає.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Єріна А.М. Статистичне моделювання та прогнозування: навч. посіб. К.: КНЕУ, 2001. 170 с.
2. Голуб С.В., Куницька С.Ю. Поліагентні функціонали в інформаційних технологіях інтелектуального моніторингу. *Математичні машини і системи*. 2020. № 4. С. 11–19. DOI: 10.34121/1028-9763-2020-4-11-19.
3. Суслов С.А., Кондратьев М.А., Сергеев К.В. Агентное моделирование как средство анализа и прогноза спроса на энергоресурсы. *Проблемы управления*. 2010. № 2. С. 46–52.
4. Виклюк Я.І. Методи екстраполяції як складова ІС для прогнозування явищ стагнації. *Математичне моделювання*. 2009. № 1 (20). С. 27–32.
5. Багаторівневе моделювання в технологіях моніторингу оточуючого середовища: монографія. Черкаси: Вид. від. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2007. 220 с.
6. Fogler H.R. A pattern recognition model for forecasting. *Management science*. 1974. N 8. P. 1178–1189.
7. Розенберг Г.С., Шитиков В.К., Брусиловский П.М. Экологическое прогнозирование (Функциональные предикторы временных рядов). Тольятти, 1994. 182 с.
8. Oliva R., Watson N. Managing Functional Biases in Organizational Forecasts: A Case Study of Consensus Forecasting in Supply Chain Planning. Mays Business School. 2007, 36 p.
9. Меркулова Т.В., Акулов Н.В. Мультиагентный подход к моделированию экономической системы в условиях нестационарной внешней среды. *Бизнесинформ*. 2009. № 4 (2). С. 117–119.
10. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с польс. И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
11. Карпа Д.М., Цмоць І.Г., Опотяк Ю.В. Нейромережеві засоби прогнозування споживання енергоресурсів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т. 28, № 5. С. 140–146.
12. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения: монографія. Харьков: Телетех, 2004. 369 с.
13. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/biweekly-cases-per-million-people>.
14. Kunitska S., Holub S. Multi-agent Monitoring Information Systems. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems. MODS 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing* / A. Palagin, A. Anisimov, A. Morozov, S. Shkarlet (eds.). 2019. Vol. 1019. P. 164–171.
15. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем. К.: Наукова думка, 1981. 296 с.
16. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика. М.: Мир, 1992. 240 с.
17. Poggio T., Girosi F. Networks for approximation and learning. *Proc. IEEE*. 1990. Vol. 78 (9). P. 1484–1487.
18. Голуб С.В. Моделювання об'єктів моніторингу доквілля за алгоритмом Степаненка. *Електроніка та системи управління*. 2006. № 4 (10). С. 165–168.
19. Голуб С.В., Куницька С.Ю. Поліагентні функціонали в інформаційних технологіях інтелектуального моніторингу. *Математичні машини і системи*. 2020. № 4. С. 11–19.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2021