

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

INFORMATION TECHNOLOGY: COMPUTER SCIENCE, SOFTWARE ENGINEERING AND CYBER SECURITY

Випуск 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2022

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

Удовик Ірина Михайлівна, кандидат технічних наук доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Алексєєв Михайло Олександрович, доктор технічних наук, професор, декан факультету інформаційних технологій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Бердник Михайло Геннадійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Кабак Леонід Віталійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Корнієнко Валерій Іванович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Корченко Анна Олександрівна, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет, Україна;

Лактіонов Іван Сергійович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Литвин Василь Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка», Україна;

Любченко Віра Вікторівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри системного програмного забезпечення, Одеський національний політехнічний університет, Україна;

Маттіас Реч, Ph.D, професор, кафедра мехатроніки, Університет Ройтлінгену, Німеччина;

Молоканова Валентина Михайлівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Мороз Борис Іванович, доктор технічних наук, професор, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Мулеса Оксана Юріївна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та мереж, Ужгородський національний університет, Україна;

Рак Тарас Євгенович, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних технологій, ПЗВО «ІТ СТЕП Університет», Україна;

Савенко Олег Станіславович, доктор технічних наук, професор, декан факультету програмування та комп'ютерних і телекомунікаційних систем, професор кафедри комп'ютерної інженерії та системного програмування, Хмельницький національний університет, Україна;

Семенов Сергій Геннадійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Україна;

Сироткіна Олена Ігорівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна;

Швачич Геннадій Григорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.

Журнал ухвалено до друку Вченою радою
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
12 травня 2022 р., протокол № 5

Науковий журнал «Information Technology: Computer Science, Software Engineering
and Cyber Security» зареєстровано Міністерством юстиції України
(Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
серія KB № 24879–14819P від 17.06.2021 року)

Офіційний сайт видання: www.journals.politehnica.dp.ua/index.php/it

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення
StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

ISSN 2786-507X (Print)
ISSN 2786-5088 (Online)

© Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2022

УДК 517.958:519.63

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-1>

Михайло БЕРДНИК

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, MGB2006@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4894-8995,

Scopus Author ID: 57196469717

Ірина УДОВИК

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, udovik.im@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5190-841X

Scopus Author ID: 55998874400

Олексій АЛЕКСЕЄВ

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, aleksey.alekseev@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4793-6669,

Наталія КАРЕВІНА

кандидат історичних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем математичних машин і систем Національної академії наук України, просп. Академіка Глушкова, 42, Київ, Україна, 03187, Natka_Kn@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3291-8946

Бібліографічний опис статті: Бердник М., Удовик І., Алексєєв О., Каревіна Н. (2022). Комп'ютерне моделювання узагальненої задачі Неймана теплообміну обтічників для ракет. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 3–8, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-1>

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЗАДАЧІ НЕЙМАНА ТЕПЛОБМІНУ ОБТІЧНИКІВ ДЛЯ РАКЕТ

До вибору теплового захисту обтічника ракет підходять з особливою ретельністю, адже обтічник повинен захищати від аеродинамічного нагріву, від випромінювання, від перепадів температури. Течії з великими числами Маха супроводжуються газодинамічними та фізико-хімічними ефектами. При обтіканні затупленого тіла утворюється ударна хвиля, яка відходить від тіла, залишаючись в околиці лобової точки практично еквідистантній його поверхні. Фізико-хімічні ефекти обумовлені зростанням температури, спричинені гальмуванням газу за ударною хвилею. При цьому відбувається перехід кінетичної енергії потоку, що набігає в теплову, збуджуються коливальні ступеня свобод молекул газу, починається його дисоціація і навіть іонізація. Ось чому до числа проблем, що представляє великий теоретичний і практичний інтерес, відноситься проблема вивчення температурних полів, що виникають в обтічників для ракет, що мають форму зрізаного конуса, якій обертаються навколо своєї осі, з урахуванням скінченності величини швидкості поширення тепла. В статті вперше побудована математична модель розрахунку температурних полів для зрізаного конуса, яка наближено моделює розподіл температурних полів, які виникають в обтічниках для ракет, з урахуванням кутової швидкості обертання та кінцевої швидкості поширення тепла у вигляді крайової задачі математичної фізики для гіперболічного рівняння теплопровідності з граничними умовами Неймана. В роботі побудоване нове інтегральне перетворення для двовимірної кінцевої простору, із застосуванням якого знайдено температурне поле у вигляді збіжного ряду. Знайдений розв'язок може знайти застосування для комп'ютерного моделювання можливої величини термомеханічних напруг, сприяти правильному вибору технологічних параметрів, об'єктивного контролю, дозволяє намітити шляхи вдосконалення теплового захисту обтічників для ракет.

Ключові слова: комплексний ряд Фур'є, крайова задача Неймана, інтегральне перетворення Лапласа, час релаксації.

Mykhailo BERDNYK

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, MGB2006@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4894-8995

Scopus Author ID: 57196469717

Iryna UDOVYK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, udovik.im@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5190-841X

Scopus Author ID: 55998874400

Oleksii ALEKSIEIEV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, aleksey.alekseev@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4793-6669

Natalia KAREVINA

PhD in History, Senior Researcher, Institute of Mathematical Machines and Systems Problems of the Ukraine National Academy of Science, 42 Academician Glushkov Avenue, Kyiv 03187, Ukraine, Natka_Kn@ukr.net

ORCID: 0000-0002-3291-8946

To cite this article: Berdnyk, M., Udovik, I., Alekseev, O., Karevina, N. (2022). Kompiuterne modeliuвання uzahalnenoi zadachi Neimana teploobminu obtichnykiv dlia raket [Computer modeling of the generalized Neyman problem of heat exchange of rocket fairing]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 3–8, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-1>

COMPUTER MODELING OF THE GENERALIZED NEYMAN PROBLEM OF HEAT EXCHANGE OF ROCKET FAIRING

The choice of thermal protection of the rocket fairing is made with special care because the fairing must protect against aerodynamic heating, radiation, and temperature changes. Currents with large Mach numbers are accompanied by gas-dynamic and physicochemical effects. When flowing around the blunt body, there is formed a shock wave which departs from the body but remains in close vicinity to the frontal point almost equidistant to its surface. Physical and chemical effects are stipulated by rising temperatures caused by the inhibition of gas by the shock wave. At the same time, there occur a transition of the kinetic energy of the rushing flow into the thermal one, excitement of fluctuating degrees of gas molecules freedoms, dissociation and even ionization. Therefore, among the problems of great theoretical and practical interest, there is the problem of studying the temperature fields arising in the fairings for missiles in the form of a truncated cone that rotates around its axis, given the finiteness of the rate of heat propagation. For the first time, a mathematical model for calculating temperature fields for a truncated cone is constructed in the article. The model approximates the distribution of temperature fields that appear in rocket fairings, taking into account the angular velocity and the finite velocity of heat propagation in the form of a boundary value problem of mathematical physics for the hyperbolic equation of thermal conductivity with Neumann boundary conditions. In the paper, there is formed a new integral transformation for a two-dimensional finite space in the application of which there is found the temperature field in the form of a convergent series. The solution found can be used for computer simulation of the possible value of thermomechanical stresses, promotion of the correct choice of technological parameters, objective control, as well as for identification of the ways to improve the thermal protection of fairings for missiles.

Key words: complex Fourier series, Neumann boundary value problem, Laplace integral transformation, relaxation time.

Актуальність проблеми. На сьогоднішній день ціна обтічників для ракет близько 5-7 мільйонів доларів. Вага обтічника Falcon 9 з діаметром 5,2 метра близько 1,9 тонни. До

вибору теплового захисту обтічника підходять з особливою ретельністю, адже обтічник повинен захищати від аеродинамічного нагріву, від випромінювання, від перепадів температури.

Наприклад, Falcon Heavy проходить звуковий бар'єр приблизно на висоті 10 км, і потім розганяється до 7-8 махів. На цих висотах повітря все ще досить щільне і відбувається сильний розігрів від аеродинамічного нагріву обтічника зі швидким охолодженням у верхніх шарах атмосфери (Чернобрышко, 2015; Аврамов, 2015). Течії з великими числами Маха супроводжуються газодинамічними та фізико-хімічними ефектами. При обтіканні затупленого тіла утворюється ударна хвиля, яка відходить від тіла, залишаючись в околиці лобової точки практично евідистантній його поверхні. Фізико-хімічні ефекти обумовлені зростанням температури, спричинені гальмуванням газу за ударною хвилею. При цьому відбувається перехід кінетичної енергії потоку, що набігає в теплову, збуджуються коливальні ступеня свобод молекул газу, починається його дисоціація і навіть іонізація. Крім того, при великих швидкостях, вплив скінченності величини швидкості поширення тепла на теплообмін стає помітним.

Ось чому до числа проблем, що представляє великий теоретичний і практичний інтерес, відноситься проблема вивчення температурних полів, що виникають в обтічниках для ракет, що мають форму зрізаного конуса, якій обертається навколо своєї осі, з урахуванням скінченності величини швидкості поширення тепла

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз праць (Чернобрышко, 2013; Чернобрышко, 2017; Чернобрышко, 2015; Бердник, 2005,) показав, що теплообмін в тілах обертання, які обертаються, вивчений в даний час ще недостатньо. В (Бердник, 2005, 37-44) показано, що чисельні методи дослідження нестационарних неосесиметричних задач теплообміну циліндра, якій обертається, є не завжди ефективними, якщо мова йде про обчислення при великих швидкостях обертання, а відомі моделі не дають змогу обчислювати температуру в обтічниках для ракет, з урахуванням кутової швидкості обертання та кінцевої швидкості поширення тепла.

Мета статті. Для моделювання температурного поля слід представити форму обтічників для ракет у вигляді зрізаного конуса, і зробити ряд розумних спрощень. Метою роботи є побудова нової математичної моделі розрахунку температурних полів для зрізаного конуса, яка наближено моделює температуру в обтічниках для ракет, у вигляді крайової задачі математичної фізики а також знаходження рішень отриманої крайової задачі.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розглянемо розрахунок температурного поля зрізаного конуса у циліндричній

системі координат (r, ϕ, z) висотою h з твірною лінією $r = \zeta(z) = R + z \cdot \operatorname{tg} A$ (рис. 1).

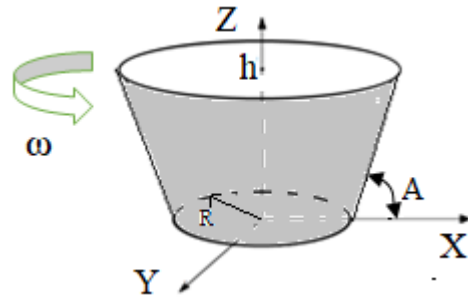


Рис. 1. Зрізаний конус з твірною лінією $r = \zeta(z)$

У початковий момент часу температура конуса постійна G_0 , а на бічній поверхні відоме значення теплового потоку $V(\phi, z)$. Теплофізичні властивості тіла не залежать від температури, а внутрішні джерела тепла відсутні. На торцях відомі значення значення теплових потоків $G_1(r, \phi)$ і $G_2(r, \phi)$ при $z = 0$ і $z = h$ відповідно. В (Бердник, 2005, 37-44) отримано узагальнене рівняння переносу енергії для рушійного елемента суцільного середовища, з урахуванням скінченності величини швидкості поширення тепла. Згідно (Бердник, 2005, 37-44) узагальнене рівняння балансу енергії твердого тіла, яке обертається, з постійною кутовою швидкістю ω навколо осі OZ, теплофізичні властивості якого не залежать від температури, а внутрішні джерела тепла відсутні, в циліндричній системі координат приймає вигляд:

$$\gamma c \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} + \omega \frac{\partial T}{\partial \phi} + \tau_r \left[\frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \omega \frac{\partial^2 T}{\partial \phi \partial t} \right] \right\} = \lambda \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

де γ – щільність середовища; c – питома теплоємність; τ_r – час релаксії; $T(r, \phi, z, t)$ – температура середовища; λ – коефіцієнт теплопровідності; t – час.

Математично задача визначення температурного поля конуса складається в інтегруванні диференціального рівняння теплопровідності (1) в області $D = \{(r, \phi, z, t) \mid r \in (0, \zeta(z)), \phi \in (0, 2\pi), z \in (0, h), t \in (0, \infty)\}$, що з урахуванням прийнятих допущень запишеться у виді:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \omega \frac{\partial \theta}{\partial \phi} + \tau_r \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \tau_r \omega \frac{\partial^2 \theta}{\partial \phi \partial t} = a \cdot \left[\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

з початковими умовами

$$\theta(r, \phi, z, 0) = 0, \quad \frac{\partial \theta(r, \phi, z, 0)}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

і граничними умовами

$$\int_0^t \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=\zeta(z)} e^{\frac{x-t}{\tau_r}} dx = G(\phi, z) \quad (4)$$

$$\int_0^t \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} e^{\frac{x-t}{\tau_r}} dx = \Theta(r, \phi), \quad \int_0^t \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=h} e^{\frac{x-t}{\tau_r}} dx = \Lambda(r, \phi) \quad (5)$$

де $\theta = \frac{T(r, \phi, z, t) - G_0}{T_{\max} - G_0}$ – відносна температура

тіла; $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коефіцієнт теплопровідності; $G(\phi, z) = \frac{V(\phi, z) \tau_r}{\lambda(T_{\max} - G_0)}$; $\Theta(r, \phi) = \frac{G_1(r, \phi) \tau_r}{\lambda(T_{\max} - G_0)}$;

$\Lambda(r, \phi) = \frac{G_2(r, \phi) \tau_r}{\lambda(T_{\max} - G_0)}$; $G(\phi, z), \Theta(r, \phi), \Lambda(r, \phi) \in C(0, 2\pi)$.

Тоді рішення крайової задачі (2)–(5) $\theta(r, \phi, z, t)$ є двічі неперервно диференційованим за r, ϕ, z , один раз за t в області D і неперервним на $\bar{D}$ (Маркович, 2010, 53), тобто $\theta(r, \phi, z, t) \in C^{2,1}(D) \cap C(\bar{D})$, а функції $G(\phi, z)$, $\Lambda(r, \phi)$, $\Theta(r, \phi)$, $\theta(r, \phi, z, t)$ можуть бути розкладені в комплексний ряд Фур'є:

$$\begin{Bmatrix} \theta(r, \phi, z, t) \\ G(\phi, z) \\ \Theta(r, \phi) \\ \Lambda(r, \phi) \end{Bmatrix} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \begin{Bmatrix} \theta_n(r, z, t) \\ G_n(z) \\ \Theta_n(r) \\ \Lambda_n(r) \end{Bmatrix} \cdot \exp(in\phi), \quad (6)$$

$$\text{де } \begin{Bmatrix} \theta_n(r, z, t) \\ G_n(z) \\ \Theta_n(r) \\ \Lambda_n(r) \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \begin{Bmatrix} \theta(r, \phi, z, t) \\ G(\phi, z) \\ \Theta(r, \phi) \\ \Lambda(r, \phi) \end{Bmatrix} \cdot \exp(-in\phi) d\phi;$$

$$G_n(z) = G_n^{(1)}(z) + i \cdot G_n^{(2)}(z);$$

$$\theta_n(r, z, t) = \theta_n^{(1)}(r, z, t) + i \theta_n^{(2)}(r, z, t);$$

$$\Theta_n(r) = \Theta_n^{(1)}(r) + i \cdot \Theta_n^{(2)}(r);$$

$$\Lambda_n(r) = \Lambda_n^{(1)}(r) + i \cdot \Lambda_n^{(2)}(r); \quad i - \text{уявна одиниця}.$$

З огляду на те, що $\theta(r, \phi, z, t)$ функція дійсна, надалі обмежимося розглядом $\theta_n(r, z, t)$ для $n=0, 1, 2, \dots$, тому що $\theta_n(r, z, t)$ і $\theta_{-n}(r, z, t)$ будуть комплексно спряженими (Маркович, 2010, 53). Підставляючи значення функцій з (6) у (2) – (5), одержимо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_n^{(i)}}{\partial t} + \vartheta_n^{(i)} \theta_n^{(m)} + \tau_r \frac{\partial^2 \theta_n^{(i)}}{\partial t^2} + \tau_r \vartheta_n^{(i)} \frac{\partial \theta_n^{(m)}}{\partial t} = \\ = a \left[\frac{\partial^2 \theta_n^{(i)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_n^{(i)}}{\partial r} - \frac{n^2}{r^2} \theta_n^{(i)} + \frac{\partial^2 \theta_n^{(i)}}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

з початковими умовами

$$\theta_n^{(i)}(r, z, 0) = 0, \quad \frac{\partial \theta_n^{(i)}(r, z, 0)}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

і граничними умовами

$$\int_0^t \frac{\partial \theta_n^{(i)}}{\partial r} \Big|_{r=\zeta(z)} e^{\frac{x-t}{\tau_r}} dx = G_n^{(i)}(z),$$

$$\int_0^t \frac{\partial \theta_n^{(i)}}{\partial r} \Big|_{z=0} e^{\frac{x-t}{\tau_r}} dx = \Theta_n^{(i)}(r), \quad \int_0^t \frac{\partial \theta_n^{(i)}}{\partial r} \Big|_{z=1} e^{\frac{x-t}{\tau_r}} dx = \Lambda_n^{(i)}(r), \quad (9)$$

де $\vartheta_n^{(1)} = -\omega n$; $\vartheta_n^{(2)} = \omega n$; $m_1 = 2$, $m_2 = 1$; $i = 1, 2$.

Застосовуємо до системи диференціальних рівнянь (7) з умовами (8)-(9) інтегральне перетворення Лапласа (Маркович, 2010, 71):

$$\tilde{f}(s) = \int_0^\infty f(\tau) e^{-s\tau} d\tau.$$

В результаті одержуємо систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} s \tilde{\theta}_n^{(i)} + \vartheta_n^{(i)} (\tilde{\theta}_n^{(m)} + \tau_r s \tilde{\theta}_n^{(m)}) + \tau_r s^2 \tilde{\theta}_n^{(i)} = \\ = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \tilde{\theta}_n^{(i)}}{\partial r} \right) - \frac{n^2}{r^2} \tilde{\theta}_n^{(i)} + \frac{\partial^2 \tilde{\theta}_n^{(i)}}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

с граничними умовами

$$\frac{\partial \tilde{\theta}_n^{(i)}}{\partial r} \Big|_{r=\zeta(z)} = \tilde{G}_n^{(i)}(z),$$

$$\frac{\partial \tilde{\theta}_n^{(i)}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \tilde{\Theta}_n^{(i)}(r), \quad \frac{\partial \tilde{\theta}_n^{(i)}}{\partial z} \Big|_{z=1} = \tilde{\Lambda}_n^{(i)}(r), \quad (11)$$

$$\text{де } \tilde{G}_n^{(i)}(z) = G_n^{(i)}(z) \left(1 + \frac{1}{s\tau_r} \right);$$

$$\tilde{\Theta}_n^{(i)}(r) = \Theta_n^{(i)}(r) \left(1 + \frac{1}{s\tau_r} \right);$$

$$\tilde{\Lambda}_n^{(i)}(z) = \Lambda_n^{(i)}(z) \left(1 + \frac{1}{s\tau_r} \right); \quad i = 1, 2.$$

Для розв'язання крайової задачі (10)-(11) застосовуємо інтегральне перетворення:

$$\bar{f}(\mu_{n,k}) = \iint_D Q(\mu_{n,k}, r, z) \cdot r \cdot f(r, z) d\sigma \quad (12)$$

Власні функції $Q(\mu_{n,k}, r, z)$ і власні значення $\mu_{n,k}$ знаходяться із розв'язку задачі:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial Q}{\partial r} - \frac{n^2}{r^2} Q + \mu_{n,k} \cdot Q + \frac{\partial^2 Q}{\partial z^2} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=\zeta(z)} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=1} = 0, \quad (14)$$

Власні функції $Q(\mu_{n,k}, r, z)$ і власні значення $\mu_{n,k}$ в (13)-(14) знаходяться по формулам, які приведені в (Berdnyk, 2018, 168-177), а формула оберненого перетворення має вигляд:

$$f(r, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Q(\mu_{n,k}, r, z)}{\|Q(\mu_{n,k}, r, z)\|^2} \bar{f}(\mu_{n,k}). \quad (13)$$

Застосовуємо до системи диференціальних рівнянь (10) із граничними умовами (11) інтегральне перетворення (12). У результаті одержуємо систему алгебраїчних рівнянь відносно $\tilde{\theta}_n^{(i)}$:

$$s\tilde{\theta}_n^{(i)} + \vartheta_n^{(i)}(\tilde{\theta}_n^{(m)} + \tau_r s\tilde{\theta}_n^{(m)}) + \tau_r s^2 \tilde{\theta}_n^{(i)} = q_{n,k} \left(\frac{\tilde{\theta}_{n,k}^{(i)}}{\mu_{n,k}^2} - \tilde{\theta}_n^{(i)} \right), \quad (14)$$

де

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_{n,k}^{(i)} &= \int_0^h \zeta(z) \cdot Q(\mu_{n,k}, \zeta(z), z) \tilde{G}_n^{(i)} dz + \\ &+ \oint_L r \left(Q(\mu_{n,k}, r, z) \frac{\partial \tilde{\theta}_n^{(i)}}{\partial z} - \tilde{\theta}_n^{(i)} \frac{\partial Q(\mu_{n,k}, r, z)}{\partial z} \right) dl; \\ q_{n,k} &= a \mu_{n,k}^2. \end{aligned}$$

Криволінійний інтеграл обчислюється по замкнутому додатно орієнтованому контуру (рис. 2).

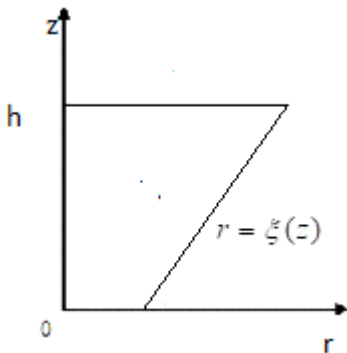


Рис. 2. Замкнутий контур із твірною $r = \zeta(z)$

Розв'язавши систему рівнянь (14), одержуємо:

$$\tilde{\theta}_n^{(i)} = a \cdot \frac{\tilde{\theta}_{n,k}^{(i)} (\tau_r s^2 + s + q_{n,k}) + (-1)^{i+1} \omega n \tilde{\theta}_{n,k}^{(m)} (1 + s \tau_r)}{(\tau_r s^2 + s + q_{n,k})^2 + \omega^2 n^2 (1 + s \tau_r)^2}. \quad (15)$$

Застосовуючи до зображення функцій (15) формули оберненого перетворення Лапласа (Лопушанська, 2014, 47) одержуємо оригінали функцій:

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_n^{(1)}(\mu_{n,k}, t) &= \sum_{j=1}^2 \zeta_{n,k}(s_j) \left\{ \tilde{\theta}_{n,k}^{(1)}(s_j) \left[(2\tau_r s_j + 1) + \tau_r \omega n i \right] + \tilde{\theta}_{n,k}^{(2)}(s_j) \left[\tau_r \omega n - (2\tau_r s_j + 1)i \right] \right\} \\ &\cdot (e^{s_j t} - 1) + \sum_{j=3}^4 \zeta_{n,k}(s_j) \left\{ \tilde{\theta}_{n,k}^{(1)}(s_j) \left[(2\tau_r s_j + 1) - \tau_r \omega n i \right] + \tilde{\theta}_{n,k}^{(2)}(s_j) \left[\tau_r \omega n + (2\tau_r s_j + 1)i \right] \right\} \cdot \\ &\cdot (e^{s_j t} - 1), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_n^{(2)}(\mu_{n,k}, t) &= \sum_{j=1}^2 \zeta_{n,k}(s_j) \left\{ \tilde{\theta}_{n,k}^{(2)}(s_j) \left[(2\tau_r s_j + 1) + \tau_r \omega n i \right] - \tilde{\theta}_{n,k}^{(1)}(s_j) \left[\tau_r \omega n - (2\tau_r s_j + 1)i \right] \right\} \\ &\cdot (e^{s_j t} - 1) + \sum_{j=3}^4 \zeta_{n,k}(s_j) \left\{ \tilde{\theta}_{n,k}^{(2)}(s_j) \left[(2\tau_r s_j + 1) - \tau_r \omega n i \right] - \tilde{\theta}_{n,k}^{(1)}(s_j) \left[\tau_r \omega n + (2\tau_r s_j + 1)i \right] \right\} \cdot \\ &\cdot (e^{s_j t} - 1), \end{aligned} \quad (17)$$

де $\zeta_{n,k}(s_j) = \frac{0.5s_j^{-1}a}{(2\tau_r s_j + 1)^2 + (\tau_r \omega n)^2}$, а значення

s_j для $j=1,2,3,4$ визначаються за формулами

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= \frac{(\tau_r \omega n i - 1) \pm \sqrt{(1 + \tau_r \omega n i)^2 - 4\tau_r q_{n,k}}}{2\tau_r}, \\ s_{3,4} &= \frac{(\tau_r \omega n i + 1) \pm \sqrt{(1 - \tau_r \omega n i)^2 - 4\tau_r q_{n,k}}}{2\tau_r}. \end{aligned}$$

Таким чином, з урахуванням формул обернених перетворень (6) і (13) одержуємо температурне поле зрізаного конуса, якій обертається з постійною кутовою швидкістю ω навколо осі OZ, із урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла:

$$\theta(r, \phi, z, t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ \sum_{k=1}^4 \left[\tilde{\theta}_n^{(1)}(\mu_{n,k}, t) + i \tilde{\theta}_n^{(2)}(\mu_{n,k}, t) \right] \frac{Q(r, z, \mu_{n,k})}{\|Q(r, z, \mu_{n,k})\|^2} \right\} \exp(in\phi),$$

де $\tilde{\theta}_n^{(1)}(\mu_{n,k}, t)$, $\tilde{\theta}_n^{(2)}(\mu_{n,k}, t)$ визначаються за формулами (16), (17).

Висновки. Вперше побудована математична модель розрахунку температурних полів для зрізаного конуса, яка наближено моделює розподіл температурних полів, які виникають в обтічниках для ракет, з урахуванням кутової швидкості обертання та кінцевої швидкості поширення тепла у вигляді крайової задачі математичної фізики для гіперболічного рівняння теплопровідності з граничними умовами Неймана. В роботі побудоване нове інтегральне перетворення для двовимірного кінцевого простору, із застосуванням якого знайдено температурне поле у вигляді збіжного ряду. Знайдений розв'язок може знайти застосування для прогнозування можливої величини термомеханічних напруг, сприяти правильному вибору технологічних параметрів, об'єктивного контролю, дозволяє намітити шляхи вдосконалення теплового захисту обтічників для ракет.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Чернобрышко М. В., Аврамов К.В., Батутина Т.Я., Дегтяренко П.Г., Тонконоженко А.М., Сулейменов У.С. Динамическая неустойчивость подкрепленных конических обтекателей ракет-носителей в сверхзвуковом газовом потоке. *Технічна механіка*. 2015. № 1. С. 15–29.
2. Аврамов К. В., Чернобрышко М. В., Батутина Т.Я., Дегтяренко П. Г., Тонконоженко А. М. Динамическая неустойчивость обтекателей ракет. *Космічна наука і технологія*. 2015. Т. 21. № 1. С. 10–14.
3. Чернобрышко М.В., Аврамов К.В., Батутина Т.Я., Меша Ю.В. Аэроупругие колебания обтекателей ракет-носителей в сверхзвуковом газовом потоке. *Вісник НТУ«ХПИ»*. 2013. № 63 (1063). С. 131–139.

4. Чернобрышко М.В., Аврамов К.В., Дегтяренко П.Г., Тонконоженко А.М., Меша Ю.В., Тишковец Е.В., Жолос О.В. Динамика композитного корпуса твердотопливного двигателя ракеты под действием импульсных нагрузок, описывающих рабочие процессы в двигателе. *Космічна наука і технологія*. 2017. Т. 23. № 1(104). С. 18–29.
5. Чернобрышко М.В., Аврамов К.В., Клименко Д.В., Батутина Т.Я. Динамическая неустойчивость обтекателей ракет-носителей в сверхзвуковом газовом потоке. Тез. докл. V Международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее», г. Днепр, 2015. С. 31.
6. Бердник М.Г. Математичне моделювання температурного поля в циліндрі, який обертається, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. Дніпропетровськ: ДНУ, 2005. С. 37–44.
7. Маркович Б. М. Рівняння математичної фізики. Львів: Львівська політехніка, 2010. 384 с.
8. Berdnyk M. The mathematic model and method for solving the dirichlet heat- exchange problem for empty isotropic rotary body. *Non-Traditional Technologies in the Mining Industry. Solid State Phenomena*. Vol. 277. Trans Tech Publications, Switzerland. 2018. pp 168–177.
9. Лопушанська Г.П., Лопушанський А.О., М'яус О.М. Перетворення Фур'є, Лапласа: узагальнення та застосування. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2014. 152 с.

REFERENCES:

1. Chernobryvko M. V., Avramov K.V., Batutina T.Ya., Degtyarenko P.G., Tonkonozhenko A.M., Suleymenov U.S. (2015). Dinamicheskaya neustoychivost podkreplennykh konicheskikh obtekateley raket-nositeley v sverkhzvukovom gazovom potoke [Dynamic instability of reinforced conical fairings of launch vehicles in a supersonic gas flow]. *Tekhnichna mehanika— Technical mechanic*, 1, 15-29 [in Ukrainian].
2. Avramov K.V., Chernobryvko M.V., Batutina T.Ya., Degtyarenko P.G., Tonkonozhenko A.M. (2015). Dinamicheskaya neustoychivost obtekateley raket [Dynamic instability of rocket fairings]. *Kosmichna nauka i tekhnologiya—Space science and technology*, 21 (Vols.), 1, pp. 10-14 [in Russian].
3. Chernobryvko M.V., Avramov K.V., Batutina T.Ya., Mesha Yu.V. (2013). Aero-uprugie kolebaniya obtekateley raket-nositeley v sverkhzvukovom gazovom potoke [Aeroelastic oscillations of launch vehicle fairings in a supersonic gas flow]. *Visnik NTU«HPI»—Bulletin of NTU "KhPI"*, № 63 (1063), pp. 131-139 [in Ukrainian].
4. Chernobryvko M.V., Avramov K.V., Degtyarenko P.G., Tonkonozhenko A.M., Mesha Yu.V., Tishkovets E.V., Zholos O.V. (2017). Dinamika kompozitnogo korpusa tverdotoplivnogo dvigatelya rakety pod deystviem impulsnykh nagruzok, opisyvayuschih rabochie protsessy v dvigatele [Dynamics of the composite body of a solid-propellant rocket engine under the action of impulse loads that describe the working processes in the engine]. *Kosmichna nauka i tekhnologiya—Space science and technology*, 23, № 1(104), pp. 18-29 [in Russian].
5. Chernobryvko M.V., Avramov K.V., Klimenko D.V., Batutina T.Ya. (2015). Dinamicheskaya neustoychivost obtekateley raket-nositeley v sverkhzvukovom gazovom potoke. Tez. dokl. V Mezhdunarodnoy konferentsii «Kosmicheskie tehnologii: nastoyashee i budushee» [Dynamic instability of launch vehicle fairings in a supersonic gas flow. Tez. report V International Conference "Space Technologies: Present and Future"], Dnepr, [in Russian].
6. Berdnyk M.G. (2005). Matematichne modeljuvannya temperaturnogo polja v cilindri, jakij obertaets'ja, z urahuvannjam kincevoi shvidkosti poshirennja tepla [Mathematical modeling of the temperature field in the cylinder, which turns out to be, with the improvement of the terminal stability of the expansion of heat]. *Pitannya prikladnoï matematiki i matematichnogo modeljuvannya—Nutrition for applied mathematics and mathematical modeling*. Dnipropetrovs'k: DNU, pp. 37-44 [in Ukrainian].
7. Markovich B.M. (2010). *Rivnyannja matematichnoï fiziki [Rivnyannia of Mathematical Physics]*. L'viv: L'vivs'ka politehnika [in Ukrainian].
8. Lopushanska H.P., Lopushanskyi A.O., M'iaus O.M. (2014). Peretvorennja Furje, Laplasa: uzagalnennja ta zastosuvannja [The transformation of Four'e, Laplace: zagalnennja that zastosuvannja]. L'viv: LNU im. Ivana Franka [in Ukrainian].
9. Berdnyk M. (2018). The mathematic model and method for solving the dirichlet heat- exchange problem for empty isotropic rotary body. *Non-Traditional Technologies in the Mining Industry. Solid State Phenomena*, Vol. 277 – Trans Tech Publications, Switzerland, pp 168-177 [in English].

UDC 51–74, 517.968.21

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-2>

Vyacheslav GOREV

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, lordjainor@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9528-9497

Scopus-Author ID: 55047688400

Alexander GUSEV

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor at the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, gusev1950@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0548-728X

Scopus-Author ID: 53163943300

Valerii KORNIENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho Avenue, Dnipro, Ukraine, 49005, kornienko.v.i@nmu.one

ORCID: 0000-0002-0800-3359

Scopus Author ID: 56446921900

To cite this article: Gorev, V., Gusev, A., Kornienko, V. (2022). Do tochnosti deiakyykh nablyzhen dlia vahovoi funktsii filtra Kolmogorova–Vinera dlia protsesiv zi stepenevoiu strukturnoiu funktsiieiu [On the accuracy of some approximations for the Kolmogorov–Wiener filter weight function for power-law structure function processes]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 9–13, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-2>

ON THE ACCURACY OF SOME APPROXIMATIONS FOR THE KOLMOGOROV–WIENER FILTER WEIGHT FUNCTION FOR POWER–LAW STRUCTURE FUNCTION PROCESSES

The paper is devoted to the investigation of the accuracy of some polynomial approximations for the Kolmogorov–Wiener filter weight function. The corresponding filter is applied to the prediction of stationary random processes with a power-law structure function. In our previous investigations the Kolmogorov–Wiener filter weight function was obtained on the basis of the truncated polynomial expansion method based on the Chebyshev polynomials of the first kind. It was obtained that some approximations lead to good results; however, some approximations (i.e. the approximations of 9–15 polynomials) fail. The corresponding conclusion was made on the basis of the evaluation of the integrals with the help of the NIntegrate function built in the Wolfram Mathematica package. In this paper the corresponding integrals are evaluated on the basis of the rectangle method, the method of trapezoids, and the Simpson method. It is shown that, in contrast to the previous investigations, the approximations of 9–15 polynomials do lead to good results.

The aim of the work is to show that, in contrast to the results of previous investigations, the considered polynomial approximations are rather accurate.

The methodology consists in the use of the rectangle method, the method of trapezoids, and the Simpson method for the calculation of the left-hand side of the Wiener–Hopf integral equation for the obtained weight function.

The scientific novelty consists in showing the validity of some polynomial approximations based on the Chebyshev polynomials of the first kind in the framework of the problem under consideration.

The conclusions are as follows. In contrast to the results of previous investigations, it is shown that the approximations of 9–15 Chebyshev polynomials of the first kind for the Kolmogorov–Wiener filter weight function for the prediction of stationary random processes with a power-law structure function are rather accurate.

Key words: Kolmogorov–Wiener filter weight function, Chebyshev polynomials of the first kind, numerical integration methods, power-law structure function processes.

В'ячеслав ГОРЕВ

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, lordjainor@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9528-9497

Scopus-Author ID: 55047688400

Олександр ГУСЕВ

кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, gusev1950@ukr.net

ORCID: 0000-0002-0548-728X

Scopus-Author ID: 53163943300

Валерій КОРНІЄНКО

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005, korniienko.v.i@ntu.one

ORCID: 0000-0002-0800-3359

Scopus Author ID: 56446921900

Бібліографічний опис статті: Горев, В., Гусев, О., Корнієнко, В. (2022). До точності деяких наближень для вагової функції фільтра Колмогорова–Вінера для процесів зі степеневою структурною функцією. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 9–13, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-2>

**ДО ТОЧНОСТІ ДЕЯКИХ НАБЛИЖЕНЬ ДЛЯ ВАГОВОЇ ФУНКЦІЇ
ФІЛЬТРА КОЛМОГОРОВА–ВІНЕРА ДЛЯ ПРОЦЕСІВ
ЗІ СТЕПЕНЕВОЮ СТРУКТУРНОЮ ФУНКЦІЄЮ**

Статтю присвячено дослідженню точності деяких поліноміальних наближень для вагової функції фільтра Колмогорова–Вінера. Відповідний фільтр застосовано до прогнозування стаціонарних випадкових процесів зі степеневою структурною функцією. В наших попередніх дослідженнях вагова функція фільтра Колмогорова–Вінера була отримана на основі методу обірваних поліноміальних розвинень, що базується на поліномах Чебишова першого роду. Було отримано, що деякі наближення призводять до хороших результатів, однак деякі наближення – ні (а саме, наближення 9–15 поліномів). Відповідний висновок було зроблено на основі обчислення інтегралів за допомогою функції *NIntegrate*, яка є вбудованою в пакет *Wolfram Mathematica*. В цій статті відповідні інтеграли обчислено на основі методу прямокутників, методу трапецій та методу Сімпсона, і показано, що на відміну від результатів попередніх досліджень, наближення 9–15 поліномів дійсно призводять до хороших результатів.

Мета роботи – показати, що на відміну від результатів попередніх досліджень, поліноміальні наближення, що розглядаються, є достатньо точними.

Методологія полягає у використанні методу прямокутників, методу трапецій та методу Сімпсона для обчислення лівої частини інтегрального рівняння Вінера–Хопфа для отриманої вагової функції.

Наукова новизна полягає в тому, що ми показали застосовність деяких поліноміальних наближень основаних на поліномах Чебишова першого роду до задачі, що розглядається.

Висновки можна сформулювати таким чином. На відміну від результатів минулих досліджень, показано, що наближення 9–15 поліномів Чебишова першого роду для вагової функції Колмогорова–Вінера для прогнозування стаціонарних процесів зі степеневою структурною функцією є достатньо точними.

Ключові слова: вагова функція фільтра Колмогорова–Вінера, поліноми Чебишова першого роду, методи числового інтегрування, процес зі степеневою структурною функцією.

Introduction. The telecommunication traffic prediction is an important problem for telecommunications. In particular, it is an urgent problem for cyber security because a cyber-attack may be detected by comparing the predicted traffic with the actual one, see (Katris, Daskal-

aki, 2015; Brugner, 2017; Iqbal, Zahid, Habib, John; 2019).

There are a plenty of different rather sophisticated approaches to traffic prediction; for example, see the review in (Katris, Daskalaki, 2015; Brugner, 2017; Iqbal, Zahid, Habib, John; 2019). However,

if the telecommunication traffic is a stationary one, such sophisticated approaches as ARIMA, neural networks and wavelet transforms may not be needed. As is known, such a simple approach as the Kolmogorov–Wiener filter may be used for the prediction of stationary random processes (Diniz, 2020). Our recent research was devoted to obtaining the Kolmogorov–Wiener filter weight function for the prediction of stationary telecommunication traffic in the framework of different models. In particular, some papers were devoted to the investigation of theoretical fundamentals of the Kolmogorov–Wiener filter construction for the prediction of traffic in a model where it is considered as a random process with a power-law structure function.

The corresponding investigations on the basis of the truncated polynomial expansion method are described in papers [5–8] (Gorev, Gusev, Korniienko, 2019; Gorev, Gusev, Korniienko, 2019; Gorev, Gusev, Korniienko, 2020; Gorev, Gusev, Korniienko, 2021). In paper (Gorev, Gusev, Korniienko, 2019) polynomials orthogonal without weight are used; in papers (Gorev, Gusev, Korniienko, 2019; Gorev, Gusev, Korniienko, 2020) the Chebyshev polynomials of the second and first kind are used, respectively. In paper (Gorev, Gusev, Korniienko, 2021) the MAEs (mean absolute errors) of the considered polynomial approximations are given. In those papers the calculations were made on the basis of the Wolfram Mathematica package, and, in particular, the left-hand side of the Wiener–Hopf integral equation was calculated with the help of the NIntegrate function built in the Wolfram Mathematica package. It was shown that the approximations mostly give reliable results; however, the approximations of 9–15 polynomials fail.

The aim of this work is to demonstrate that, in contrast to our previous results, the above-mentioned approximations of 9–15 polynomials are indeed valid. For these purpose we calculate the left-hand side of the Wiener–Hopf integral equation on the basis of the widely known methods of numerical integration rather than the NIntegrate function. We use such methods as the rectangle method, the method of trapezoids, and the Simpson method. This paper is devoted only to the investigation of the Chebyshev polynomials of the first kind. The preliminary results devoted to the Chebyshev polynomials of the second kind are published in (Gorev, 2021).

Wiener–Hopf integral equation and the truncated polynomial expansion method. In this paper we investigate the use of the Kolmogorov–Wiener filter to the prediction of a stationary random process with a power-law structure function. The

correlation function of such a process is as follows, see, for example, (Gorev, Gusev, Korniienko, 2019):

$$R(t) = \sigma^2 - \frac{\alpha}{2} |t|^{2H} \quad (1)$$

where σ is the process variance, H is the Hurst exponent, and α is a proportionality coefficient between $|t|^{2H}$ and the structure function. The traffic is considered as a random continuous stationary process; such a consideration may be valid in the case of a large amount of data. The Kolmogorov–Wiener filter weight function obeys the following Wiener–Hopf integral equation:

$$\int_0^T h(\tau) R(t - \tau) d\tau = R(t + z) \quad (2)$$

where T is the time interval for which the input data are given, and z is the time interval for which the forecast is made. In papers (Gorev, Gusev, Korniienko, 2019; Gorev, Gusev, Korniienko, 2019; Gorev, Gusev, Korniienko, 2020; Gorev, Gusev, Korniienko, 2020; Gorev, Gusev, Korniienko, 2021; Gorev, 2021) the following numerical values for these parameters were investigated:

$$\sigma = 1.2, H = 0.8, \alpha = 3 \cdot 10^{-3}, T = 100, z = 3. \quad (3)$$

The explicit analytical solution of the integral equation (2) meets difficulties, so the solution of (2) may be found on the basis of the truncated polynomial expansion method (see, for example, (Gorev, Gusev, Korniienko, 2020)). In the case of the Chebyshev polynomials of the first kind, the method is as follows. The unknown weight function in the n –polynomial approximation is sought as a truncated series (Gorev, Gusev, Korniienko, 2020):

$$h(\tau) = \sum_{s=0}^{n-1} g_s T_s \left(\frac{2\tau}{T} - 1 \right), \quad (4)$$

where g_s are the unknown coefficients, and $T_s(x)$ are the Chebyshev polynomials of the first kind. On the basis of (1) – (4) one can obtain the following system of linear equations in g_s :

$$\begin{aligned} \sum_{s=0}^{n-1} g_s \int_0^T \int_0^T T_k \left(\frac{2t}{T} - 1 \right) T_s \left(\frac{2\tau}{T} - 1 \right) R(t - \tau) d\tau dt = \\ = \int_0^T T_k \left(\frac{2t}{T} - 1 \right) R(t + z) dt \end{aligned} \quad (5)$$

which after the evaluation of the corresponding integrals may be solved via the matrix method. The accuracy of the n –polynomial approximation may be checked by comparing the left-hand side and the right-hand side of the integral equation (2) and calculating the MAE:

$$\text{MAE} = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \text{Left}(t) - \text{Right}(t) \right|, \text{Right}(t) = R(t + z),$$

$$\text{Left}(t) = \int_0^T h(\tau) R(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

where $h(\tau)$ is given by expression (4), and the coefficients g_s are the solution of (5).

In our previous investigations (Gorev, Gusev, Korniienko, 2020; Gorev, Gusev, Korniienko, 2021) we calculated the function $\text{Left}(t)$ in (6) via the NIntegrate function built in the Wolfram Mathematica package. The results were as follows: the approximations of rather high numbers of polynomials lead to good results, except for the 9–15 polynomial approximations, which failed. In the framework of this paper we calculate $\text{Left}(t)$ via the rectangle method, the method of trapezoids, and the Simpson method.

The calculation of the left-hand side of the Wiener–Hopf integral equation on the basis of widely known numerical integration methods. In the framework of the rectangle method (the mid-point rule) the function $\text{Left}(t)$ is calculated on the basis of (6) as follows:

$$\begin{aligned} \text{Left}(t) &= \int_0^T h(\tau) R(t-\tau) d\tau \approx \\ &\approx \sum_{i=1}^N h\left(\frac{\tau_{i-1} + \tau_i}{2}\right) R\left(t - \frac{\tau_{i-1} + \tau_i}{2}\right) \cdot \Delta\tau \end{aligned} \quad (7)$$

where

$$\Delta\tau = \frac{T}{N}, \quad \tau_j = \frac{jT}{N}, \quad (8)$$

N is the number of partition points.

In the framework of the method of trapezoids the function $\text{Left}(t)$ is calculated as

$$\text{Left}(t) \approx \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (h(\tau_{i-1}) R(t-\tau_{i-1}) + h(\tau_i) R(t-\tau_i)) \cdot \Delta\tau. \quad (9)$$

In the framework of the Simpson method the function $\text{Left}(t)$ is as follows:

$$\begin{aligned} \text{Left}(t) &\approx \frac{1}{6} \sum_{i=1}^N (h(\tau_{i-1}) R(t-\tau_{i-1}) + \\ &+ 4h\left(\frac{\tau_{i-1} + \tau_i}{2}\right) R\left(t - \frac{\tau_{i-1} + \tau_i}{2}\right) + h(\tau_i) R(t-\tau_i)) \Delta\tau. \end{aligned} \quad (10)$$

The value $N = 10^3$ is chosen. The MAE is estimated as

$$\begin{aligned} \text{Left}(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T |\text{Left}(t) - \text{Right}(t)| dt \approx \\ &\approx \frac{1}{N_1 + 1} \sum_{j=0}^{N_1} |\text{Left}(\tau_j) - \text{Right}(\tau_j)|, \end{aligned} \quad (11)$$

where the value $N_1 = 10^3$ is chosen. The numerical results are given in Table 1.

So, as can be seen, for all the considered methods the approximations of 9–15 polynomials lead to small values of MAE (i.e., to a good agreement between the left-hand side and the right-hand side of the Wiener–Hopf integral equation). The results significantly differ from the corresponding results for the NIntegrate function obtained in (Gorev, Gusev, Korniienko, 2020; Gorev, Gusev,

Table 1

The MAE results for different methods and the comparison with the results of the NIntegrate function (Gorev, Gusev, Korniienko, 2021)

n	MAE, rectangle method	MAE, method of trapezoids	MAE, Simpson method	MAE, NIntegrate function [8]
1	$6,4 \cdot 10^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{-1}$	$6,4 \cdot 10^{-1}$
2	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$
3	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$	$7,9 \cdot 10^{-2}$
4	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$
5	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$8,9 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-3}$
6	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$
7	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
8	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
9	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^2$
10	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^2$
11	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$7,9 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^3$
12	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^4$
13	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^5$
14	$5,6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^6$
15	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^7$
16	$8,6 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$
17	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
18	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$

Korniienko, 2021). So, one can conclude that, in the framework of the truncated polynomial expansion method based on the Chebyshev polynomials of the first kind, the NIntegrate function may not be applicable to the calculation of the left-hand side of the Wiener–Hopf integral equation, and the approximations of 9–15 polynomials are indeed accurate enough. It should be stressed that the same situation is observed in (Gorev, 2021) for the Chebyshev polynomials of the second kind.

Conslusions. We investigate the theoretical fundamentals of the Kolmogorov–Wiener filter construction for the prediction of stationary random processes with a power-law structure function. Such an investigation may be applied to the telecommunication traffic prediction, which may be important for cyber security.

The unknown weight function is sought as a truncated series in the Chebyshev polynomials of the first kind. The numerical parameters (3) are

investigated. The approximations of rather high numbers of polynomials are accurate enough. It is shown that, in contrast to the results of the previous investigations, the approximations of 9–15 polynomials are rather accurate, and the NIntegrate function, which is built in the Wolfram Mathematica package, may not be applicable for the calculation of the left-hand side of the Wiener–Hopf integral equation for the corresponding approximations.

The results of the paper may be taken into account for the prediction of telecommunication traffic in the power-law structure function model, which may be useful for the detection of cyber-attacks by comparing the predicted traffic with the actual one.

The plan for the future is to show the validity of the corresponding polynomial approximations in the framework of the use of polynomials orthogonal without weight.

REFERENCES:

1. Katris C., Daskalaki S. Comparing forecasting approaches for Internet traffic. *Expert Systems with Applications*. 2015, Vol. 30, Issue 42, pp. 8172–8183. doi: 10.1016/j.eswa.2015.06.029
2. Brugner H., Holt-Winters Traffic Prediction on Aggregated Flow Data. Proceedings of the Seminars Future Internet and Innovative Internet Technologies and Mobile Communication. Focal Topic: Advanced Persistent Threats. Summer Semester 2017 (2017), 25–32. doi: 10.2313/NET-2017-09-1_04.
3. Iqbal M. F., Zahid M., Habib D., John L. K. Efficient Prediction of Network Traffic for Real-Time Applications. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2019, Vol. 2019, Article ID 4067135, 11 pages. doi: 10.1155/2019/406713
4. Diniz P. S. R. Adaptive Filtering Algorithms and Practical Implementation, 5th ed.: Springer Nature Switzerland AG, Cham, 2020, 495 p. doi: 10.1007/978-3-030-29057-3.
5. Gorev V.N., Gusev A.Yu., Korniienko V.I. Polynomial solutions for the Kolmogorov–Wiener filter weight function for fractal processes. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 2, p. 44–52, doi: 10.15588/1607-3274-2019-2-5
6. Gorev V., Gusev A., Korniienko V. Investigation of the Kolmogorov–Wiener filter for treatment of fractal processes on the basis of the Chebyshev polynomials of the second kind. *Ceur Workshop Proceedings*, 2019, Vol. 2353, p. 596–606. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2353/paper47.pdf>
7. Gorev V., Gusev A., Korniienko V. Investigation of the Kolmogorov–Wiener filter for continuous fractal processes on the basis of the Chebyshev polynomials of the first kind. *IAPGOS*, 2020, No.1, p. 58–61. doi: 10.35784/iapg.912
8. Gorev V., Gusev A., Korniienko V., Aleksieiev M. Kolmogorov–Wiener Filter Weight Function for Stationary Traffic Forecasting: Polynomial and Trigonometric Solutions ; in: P. Vorobiyenko, M. Ilchenko, I. Strelkovska (Eds.), *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, vol. 212, Springer, pp. 111–129. doi:10.1007/978-3-030-76343-5_7
9. Gorev V. N. On the accuracy of some polynomial approximations for the Kolmogorov–Wiener filter weight function. *Proceedings of the Young scientists conference: science and innovation*, Dnipro, Ukraine, 2021, p. 287–288, URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2021/molod-2021.pdf>

УДК 519.8

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-3>

Олег ЄМЕЦЬ

доктор фізико-математичних наук, професор, yemetsli@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9248-9234

Scopus Author ID: 8721572000

Оксана ЧЕРНЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000, oksanachernenko7@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9084-0999

Scopus Author ID: 36862730800

Тетяна ПАРФЬОНОВА

кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000, tara.poltava@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9343-2061

Scopus Author ID: 36089160700

Олена ОЛЬХОВСЬКА

кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Полтавський університет економіки і торгівлі, вул. Ковалю, 3, Полтава, Україна, 36000, lena@olhovsky.name

ORCID: 0000-0001-5366-5995

Scopus Author ID: 42262220700

Бібліографічний опис статті: Ємець, О., Черненко, О., Парфьонова, Т., Ольховська, О. (2022).

Математична модель задачі оптимального розміщення продуктивних сил з врахуванням мінімальної шкоди навколишньому середовищу. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 14–19, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-3>

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ПРОДУКТИВНИХ СИЛ З ВРАХУВАННЯМ МІНІМАЛЬНОЇ ШКОДИ НАВКОЛИШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩУ

У роботі проаналізовано останні дослідження та публікації по управлінню якістю природного середовища. Виявлено невирішені раніше питання та задачі прогнозування на перспективу. Запропоновано постановку задачі оптимального розміщення продуктивних сил з позиції мінімізації збитків для навколишнього середовища при нормальній експлуатації об'єкта.

Побудовано математичну модель такої задачі у вигляді задачі з дробово-лінійною цільовою функцією, що представляє собою відношення загальних витрат промислового сектору регіону до загального прибутку. Детально обґрунтовано та наведено формули обчислення кожної компоненти функції загальних витрат промислового сектору регіону. Зокрема, представлені співвідношення для витрат у сфері постачання; витрат на виробництво; витрат у сфері збуту, витрат на управління виробничою системою. До функції загальних витрат враховано витрати природоохоронної сфери, що формуються за рахунок поточних та капітальних природоохоронних витрат. Еколого-економічний збиток, як складова частина функції загальних витрат, у виробничій сфері для окремого промислового вузла, включає наступні компоненти: можливий недоотриманий прибуток внаслідок незапланованого скорочення обсягів виробництва продукції; додаткові витрати; втрати, пов'язані з відшкодуванням збитків та витрати різного типу матеріальних ресурсів.

Математична модель включає комбінаторну умову на кількості виготовленої продукції окремого виду на окремому промисловому об'єкті, коли значення змінних вибираються з комбінаторної множини розміщень. Модель також містить лінійні обмеження на загальну кількість конкретного типу продукції. На коефіцієнти, що визначають частку матеріальних ресурсів у загальному матеріальному потоці транспортно-складського господарств, накладаються додаткові умови.

Побудована модель задачі вибору території під будівництво промислових об'єктів з метою мінімізації збитків для природного середовища на рівні регіону, що враховує соціально-економічні потреби його населення та екологічну безпеку, може бути використана при плануванні та проектуванні.

Ключові слова: техногенно-екологічна безпека, мінімізація витрат, ефективне функціонування регіону, промисловий вузол, дробово-лінійна цільова функція, комбінаторна оптимізація.

Oleg IEMETS

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, yemetsli@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9248-9234

Scopus Author ID: 8721572000

Oksana CHERNENKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Computer Science and Information Technology Department, Poltava University of Economics and Trade, 3 Koval str., Poltava, Ukraine, 36000, oksanachernenko7@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9084-0999

Scopus Author ID: 36862730800

Tatyana PARFONOVA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Computer Science and Information Technology Department, Poltava University of Economics and Trade, 3 Koval str., Poltava, Ukraine, 36000, tapa.poltava@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9343-2061

Scopus Author ID: 36089160700

Olena OLKHOVSKA

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Computer Science and Information Technology, Poltava University of Economics and Trade, 3 Koval str., Poltava, Ukraine, 36000, lena@olkhovsky.name

ORCID: 0000-0001-5366-5995

Scopus Author ID: 42262220700

To cite this article: Iemets, O., Chernenko, O., Parfonova, T., Olkhovska, O. (2022). Matematychna model zadachi optymalnoho rozmishchennia produktyvnykh syl z vrakhuvanniam minimalnoi shkody navkolyshnomu seredovyshchu [Mathematical model of the problem of optimal location of productive forces taking into account the minimum damage to the environment]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 14–19, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-3>

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF OPTIMAL LOCATION OF PRODUCTIVE FORCES TAKING INTO ACCOUNT THE MINIMUM DAMAGE TO THE ENVIRONMENT

The work analyses the latest research and publications on the quality management of the natural environment. It reveals the previously unresolved problems and tasks of forecasting for the future. The task of optimal distribution of productive forces from the standpoint of minimization of costs for the environment under the normal operation of the object proposed.

A mathematical model of this problem formed with a fractional-linear objective function, which is the ratio of total costs of the industrial sector of the region to the total income was created. It is explaining in detail and the formulas for calculation of each component of the function of the total costs of the industrial sector of the region are given. In particular, there are presented comparisons for costs in the sphere of supply; costs for production; costs in the sphere of distribution, costs for production system management. The function of total costs includes environmental costs, which form at the expense of current and capital environmental costs. Environmental and economic costs, as a constituent part of the total costs function, in the production sphere for a particular industrial unit, includes the following components: possible unrealized profit due to unplanned reduction in the volume of production; additional costs; costs associated with loss compensation and costs of various types of material resources.

The mathematical model includes a combinatorial condition on the number of manufactured products of a particular type on a particular industrial facility, when the values of the variables are selected by the combinatorial multiplicity

of dimensions. The model also contains line limitations on the total quantity of a particular type of production. Additional conditions are imposed on the coefficients that determine the share of material resources in the total material flow of transport and storage enterprises.

The model of the problem is selecting the area for the construction of industrial facilities to minimize losses to the natural environment at the level of the region, which takes into account the social and economic needs of its population and environmental safety, can be used in the planning and design.

Key words: technogenic and environmental safety, cost minimization, efficient functioning of the region, industrial output, fractional and linear target function, combinatorial optimization.

Актуальність проблеми. Україна перебуває в ситуації, яка змушує завдання розвитку промислового виробництва підпорядковувати стратегії техногенно-екологічної безпеки в інтересах узгодження економіки та екології. Розміщення продуктивних сил і охорона навколишнього середовища є взаємообумовленими.

Важливим завданням регулювання техногенного навантаження на територію є не тільки використання розміщення як засобу оптимізації взаємовідносин суспільства і природи, а й урахування екологічних чинників та умов на всіх стадіях розміщення продуктивних сил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки опубліковано достатньо багато праць по управлінню якістю навколишнього середовища, в яких прослідковуються різні підходи до даної проблеми. Всебічне обґрунтування збалансованого розміщення продуктивних сил набуває дедалі більшого значення (Коблянська, 2011; Лутковська, 2020; Сокур, 2020; Хилько, 2017), однак при цьому не менш важливим є прогнозування на перспективу. Необхідно створити наукову базу для реалізації принципів розвитку і розміщення продуктивних сил, які не допустять при проектуванні надлишкову концентрацію промислового виробництва.

Мета дослідження. Основними завдання регіону є розвантаження найбільших промислових районів, де зосереджена надмірна кількість великих підприємств важкої промисловості; зрушення у розміщенні нових підприємств важкої промисловості; розміщення нових підприємств у малих і середніх містах; обмеження розвитку екологічно небезпечних підприємств у районах з надмірним забрудненням навколишнього середовища; поліпшення внутрішньої структури "старих" промислових комплексів, наприклад, створення підприємств для переробки відходів, побічної продукції.

Головним завданням є обґрунтування оптимального розміщення продуктивних сил. Поняття «оптимальності» передбачає одержання якомога більшого ефекту від правильно розміщеного підприємства, від найкращої територіальної організації регіону, країни. На рівні підприємства ефект виражається у прибутку, на рівні країни – у національному доході. Однак

«оптимальність» не означає, що байдуже, яким чином забезпечуватиметься найбільший ефект. Треба співвідносити розмір ефекту з витратами, тобто – розрахувати ефективність витрат. Необхідно також враховувати соціальний та демографічний фактори.

Отже, оптимальне розміщення продуктивних сил не завжди має на меті одержання найбільшого прибутку. Проте раціонально організовані продуктивні сили зводять до мінімуму втрати та об'єктивно сприяють посиленню економічного потенціалу країни.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для розширення виробництва важкої промисловості в країні проектується будівництво m нових промислових об'єктів. За результатами проведеного екологічного моніторингу нові промислові об'єкти можуть бути розміщені в n промислових вузлах. Завдання полягає в поєднанні вимог техногенно-екологічної безпеки з досягненням достатнього обсягу виробництва, що відповідають мінімальним витратам на виробництво одиниці продукції (обсяг збитків віднесений до прибутку був мінімальним).

Вибір території під будівництво будемо розглядати з позиції: мінімізації збитків для природного середовища при нормальній експлуатації об'єкта.

Для побудови математичної моделі, використовуючи термінологію з (Стоян, 1993, с. 45], позначимо $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ – мультимножину, елементами якої є прогнозовані обсяги виготовленої продукції. Усі можливі m -вибірки з мультимножини G утворюють загальну множину розміщень E_{nn}^m , де n – число різних серед елементів G . Позначимо x_{ij} – кількість виробленої i -ої продукції в j -ому промисловому вузлі, $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$; d_{ij} – прибуток від продажу одиниці i -ої продукції, що вироблена в j -ому промвузлі.

Використовуючи роботу (Коблянська, 2011, с. 100), функція загальних витрат C_{gen} промислового сектору регіону запишеться так:

$$C_{gen} = \sum_{j=1}^J \left(C_{supply}^j + C_{prod}^j + C_{sales}^j + C_{cons}^j + C_{manag}^j + L_{com}^j \right). \quad (1)$$

Розпишемо далі кожен компоненту співвідношення (1).

Витрати у сфері постачання C_{supply}^j для j -го промвузла можуть бути оцінені за формулою:

$$C_{supply}^j = C_{att}^{FR} + C_{tr}^{FR} \cdot k_{tr}^{FR} + C_{main}^{FR} \cdot k_{war}^{FR} + C_{labor}^{war} \cdot k_{war}^{FR} + C_{labor}^{tr} \cdot k_{tr}^{FR} + C_{att}^{FR} + A^{war} \cdot k_{war}^{FR} + A^{tr} \cdot k_{tr}^{FR} + C_{supply}^{cap} \cdot k_{supply}^{cap}, \quad (2)$$

де C_{att}^{FR} – витрати залучення матеріальних ресурсів (МР) у виробничий процес, грн.; C_{tr}^{FR} – витрати на транспортування МР, грн.; C_{main}^{FR} – витрати, пов'язані зі зберіганням МР на складах підприємства, грн.; C_{labor}^{war} , C_{labor}^{tr} – витрати на оплату праці відповідно складського та транспортного господарств, грн.; C_{ret}^{FR} – витрати, пов'язані із поверненням МР неналежної якості, грн.; A^{war} , A^{tr} – амортизаційні відрахування на основні засоби у складському та транспортному господарстві, грн.; C_{supply}^{cap} – капітальні інвестиції, грн.; k_{tr}^{FR} , k_{war}^{FR} – коефіцієнти, що визначають частку МР у загальному матеріальному потоці транспортного та складського господарств відповідно, безрозмірні; k_{supply}^{cap} – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень у сфері постачання МР, безрозмірний.

Витрати виробництва C_{prod}^j для j -го промвузла можуть бути описані співвідношенням:

$$C_{prod}^j = C_{pr.manag.} + C_{tech} + C_{serv}^{pv} + C_{in.tr.} + C_{serv}^{FA} + A^{FA} + C_{rec} + C_{cert} + C_{prod}^{cap} \cdot k_{prod}^{cap}, \quad (3)$$

де $C_{pr.manag.}$ – витрати на управління виробництвом (оплата праці; витрати на охорону праці, ведення документації і т.і.), грн.; C_{tech} – витрати на удосконалення технологій, поліпшення якості продукції, грн.; C_{serv}^{pv} – витрати на обслуговування виробничого процесу та контроль якості продукції, грн.; $C_{in.tr.}$ – витрати на міжцехові транспортування МР та ресурсів незавершеного виробництва, грн.; C_{serv}^{FA} – витрати на обслуговування основних засобів загального призначення, грн.; A^{FA} – амортизація основних засобів, грн.; C_{rec} – витрати рециклінгу (повернення відходів у виробництво), грн.; C_{cert} – витрати на сертифікацію продукції, грн.; C_{prod}^{cap} – капітальні інвестиції, грн.; k_{prod}^{cap} – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, безрозмірний.

Витрати у сфері збуту для j -го промвузла C_{sales}^j запишемо так:

$$C_{sales}^j = C_{ord}^{FP} + \sum_{i=1}^I C_{tr_i}^{FP} \cdot k_{tr_i}^{FP} \cdot x_{ij} + C_{accept}^{FP} + \sum_{i=1}^I C_{maint_i}^{FP} \cdot x_{ij} \cdot k_{war_i}^{FP} + C_{labor}^{tr} \cdot k_{tr}^{FP} + C_{ret}^{FP} + C_s + C_d + A^{war} \cdot k_{war}^{FP} + A^{tr} \cdot k_{tr}^{FP} + C_{sales}^{cap} \cdot k_{sales}^{cap}, \quad (4)$$

де C_{ord}^{FP} – вартість контролю замовлень споживачів, грн.; $C_{tr_i}^{FP}$ – витрати на транспортування одиниці i -ої готової продукції (ГП), грн.; C_{accept}^{FP} – витрати на приймання партії готової продукції на складах, грн.; $C_{maint_i}^{FP}$ – вартість зберігання одиниці i -ої ГП на складах, грн.; C_{ret}^{FP} – витрати на повернення ГП неналежної якості,

грн.; C_s – витрати на сервіс, грн.; C_d – витрати на дилерську мережу, грн.; C_{sales}^{cap} – капітальні інвестиції у сфері збуту, грн.; $k_{tr_i}^{FP}$, $k_{war_i}^{FP}$ – коефіцієнти, що характеризують частку ГП у загальному матеріальному потоці складського та транспортного господарств, безрозмірні; k_{sales}^{cap} – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, безрозмірний.

Витрати природоохоронної сфери для j -го промвузла C_{cons}^j формуються за рахунок поточних та капітальних природоохоронних витрат:

$$C_{cons}^j = C_{cons}^{cap} \cdot k_{cons}^{cap} + C_{FR} + A_{cons}^{FA} + C_{labor}^{cons}, \quad (5)$$

де C_{cons}^{cap} – капітальні інвестиції в охорону природного середовища, грн.; k_{cons}^{cap} – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, безрозмірний; C_{FR} – витрати на ресурси та матеріали під час здійснення природоохоронної діяльності, грн.; A_{cons}^{FA} – амортизаційні відрахування на основні засоби природоохоронного призначення, грн.; C_{labor}^{cons} – витрати на оплату праці співробітників природоохоронної служби, грн.

Витрати на управління виробничою системою для j -го промвузла C_{manag} можуть бути оцінені співвідношенням:

$$C_{manag} = C_{m.manag} + C_m^{FA} + C_{CIT} + A_{g.econom}^{FA} + A_{g.econom}^{IA} + C_{serv}^{FF} + C_{st} + C_{perm} + C_{sc.tech} + C_{g.econom}^{cap} \cdot k_{g.econom}^{cap}, \quad (6)$$

де $C_{m.manag}$ – витрати на утримання загальногосподарського (ЗГ) персоналу, грн.; C_m^{FA} – витрати на утримання основних засобів загальногосподарського використання (ОС ЗГВ), грн.; C_{CIT} – витрати, пов'язані з використанням ІКТ, засобів зв'язку, документообігом, грн.; $A_{g.econom}^{FA}$ – амортизація ОС ЗГВ, грн.; $A_{g.econom}^{IA}$ – амортизація нематеріальних активів ЗГВ, грн.; C_{serv}^{FF} – витрати на обслуговування фінансових потоків, грн.; C_{st} – витрати на навчання управлінських кадрів, грн.; C_{perm} – витрати на отримання ліцензій та дозволів, грн.; $C_{sc.tech}$ – витрати на проведення конструкторських робіт, грн.; $C_{g.econom}^{cap}$ – капітальні інвестиції ЗГ призначення, грн.; $k_{g.econom}^{cap}$ – коефіцієнт ефективності капітальних вкладень у сфері управління, безрозмірний.

Еколого-економічний збиток L_{com}^j у виробничій системі j -го промвузла оцінюється за формулою:

$$L_{com}^j = \sum_{k=1}^K (Pr_i - C_i^{ch}) \cdot x_{ij} \cdot R_{ik} \cdot \beta_{ik} + \sum_{k=1}^K (Q_{ik}^f - Q_{ik}^r) \cdot Pr_{ik} \cdot x_{ij} + C_{reimb}^{ee} + \sum_{k=1}^K (Pr_{ik}^{us} - C_{ik}^{us}) \cdot Q_{ik}^f \cdot x_{ij} + \sum_{z=1}^Z T_z^{ec} + P_{econ} + P_{env.prot}, \quad (7)$$

де перша компонента визначає недоотриманий прибуток внаслідок скорочення обсягів вироблення продукції, зокрема: Pr_i – ціна одиниці i -ої

продукції, C_i^{ch} – питомі змінні витрати на виробництво одиниці i -ої продукції, R_{ik} – показник, що характеризує ефективність використання k -ого ресурсу при виробництві i -ої продукції, β_{ik} – показник, що характеризує непланові втрати k -ого ресурсу при виробництві i -ої продукції. Другий доданок співвідношення (7) визначає додаткові витрати та включає такі величини: Q_{ik}^f , Q_{ik}^r – фактична та нормативна використані кількості k -ого ресурсу при виробництві одиниці i -ої продукції, P_{ik} – ціна k -ого ресурсу, що використовується при виробництві одиниці i -ої продукції, C_{reimb}^{ee} – витрати, пов'язані з відшкодуванням збитків. Четверта складова (7) визначає втрати матеріальних ресурсів і включає P_{ik}^{us} – ціна k -ого ресурсу, що використовується при виробництві одиниці i -ої продукції, за оцінкою можливого його використання, C_{ik}^{us} – витрати на відновлення k -ого ресурсу для використання у виробництві одиниці i -ої продукції, Q_{ik}^f – обсяг втраченого k -ого ресурсу, що використовується у виробництві одиниці i -ої продукції. T_z^{ec} – витрати на сплату екологічного податку за забруднення z -го компоненту довкілля, P_{econ} , $P_{env.prot}$ – штрафні санкції за порушення господарського та природоохоронного законодавства, грн.

Величина T_z^{ec} може бути розрахована, як в роботі (Ємець, 2012, с. 80).

Враховуючи співвідношення (1)–(7) та введені позначення, математична модель задачі запишеться у вигляді: знайти упорядковану пару $\langle C(x^*), x^* \rangle$ таку, що

$$C(x^*) = \min_{x \in R^m} \frac{C_{gen}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij}}, \quad x^* = \arg \min_{x \in R^m} \frac{C_{gen}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij}}, \quad (8)$$

за комбінаторної умови

$$x = (x_{11}, \dots, x_{1J}, x_{21}, \dots, x_{2J}, \dots, x_{I1}, \dots, x_{IJ}) = (x_1, \dots, x_m) \in E_{\eta^n}^m(G) \subset R^m \quad (9)$$

та за лінійних обмежень на необхідну кількість продукції

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} \leq A_i, \quad i = \overline{1, I}, \quad (11)$$

де A_i – максимально необхідна кількість i -ої продукції.

Враховуючи, що ресурси незавершеного виробництва зберігаються у виробничих приміщеннях, для коефіцієнтів k_{war}^{FR} , k_{war}^{FP} , k_{tr}^{FR} , k_{tr}^{FP} виконуються умови

$$k_{war}^{FR} + k_{war}^{FP} = 1, \quad (12)$$

$$k_{tr}^{FR} + k_{tr}^{FP} = 1. \quad (13)$$

Висновки та перспективи подальших досліджень. Запропонована модель (8)–(13) визначає взаємозалежність витрат та результатів виробництва з урахуванням екологічної складової, що дозволяє приймати управлінські рішення, які забезпечують підвищення еколого-економічної ефективності функціонування регіону.

В подальшому доцільно побудувати алгоритм розв'язку запропонованої моделі та запрограмувати його.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Коблянська І. І. Науково-методичні основи екологічно орієнтованого логістичного управління промисловим виробництвом: дис. ... канд. економ. Наук : 08.00.06; Сумський державний університет. Суми, 2011. 234 с.
2. Лутковська С. М. Модернізація системи екологічної безпеки сталого розвитку: дис. ... док. економ. наук: 08.00.03; Вінницький національний аграрний університет. Вінниця, 2020. 481 с.
3. Індикатори стану екологічної безпеки держави. Аналітична записка. Національний інститут стратегічних досліджень. URL: <http://www.niss.gov.ua/articles/993/> (дата звернення: 26.05.2020).
4. Екологічна безпека та економіка: монографія / М.І. Сокур, В.М. Шмандій, Є.К. Бабець, В.С. Білецький, І.Є. Мельнікова, О.В. Харламова, Л.С. Шелудченко. Кременчук, 2020. 240 с.
5. Коблянська І.І. Інновації як основа стратегії регіонального розвитку в умовах переходу до «зеленої» економіки. *Механізм регулювання економіки*. 2015. № 4. С. 17–28.
6. Бойко Т.В. Актуальні проблеми економічної безпеки України. URL: <http://library.kr.ua/orhus/bojko.pdf> (дата звернення: 14.07.2020).
7. Хилько М. І. Екологічна безпека України: навчальний посібник. Київ: Київський нац. ун-т ім. Т. Шевченка, 2017. 267 с.
8. Носова О.В., Маковоз О.С. Моделі економічної безпеки регіону. *Вісник Національної юридичної академії України імені Ярослава Мудрого*. Харків: НЮАУ імені Ярослава Мудрого, 2011. № 4. С. 36–45.
9. Герасимчук З.В., Олексюк А.О. Екологічна безпека регіону: діагностика та механізм забезпечення: монографія. Луцьк: Надстир'я. 2007. 280 с.

10. Ємець О.О., Черненко О.О. Модель функціонування регіону: оцінка екологічної безпеки : III Всеукраїнська науково-практична конференція «Інформатика та системні науки». 1–3 березня 2012 р. С. 80–83.
11. Стоян Ю. Г., Ємець О.О. Теорія і методи евклідової комбінаторної оптимізації. Київ : Інститут системних досліджень освіти, 1993. 188 с.

REFERENCES:

1. Koblyanska I.I. (2011). *Naukovo-metodychni osnovy ekolohichno oriyentovanoho lohistychnoho upravlinnya promyslovym vyrobnytstvom: Dys. ... kand. ek. nauk: 08.00.06* [Scientific and methodological foundations of environmentally friendly logistics management of industrial production: Dis. ... cand. ec. sciences: 08.00.06.] Sumy State University. Sumy. 234 p. [in Ukrainian]
2. Lutkovskaya S. M. (2020). *Modernizatsiya systemy ekolohichnoyi bezpekы staloho rozvytku: Dys. ... dok. ek. nauk: 08.00.03* [Modernization of the environmental safety system of sustainable development: Dis. ... doc. ec. sciences: 08.00.03.] Vinnytsia National Agrarian University. Vinnytsia, 481 p. [in Ukrainian]
3. *Indykatory stanu ekolohichnoyi bezpekы derzhavы. Analitichna zapyska* [Indicators of the state of ecological safety of the state. Analytical note]. *National Institute for Strategic Studies*. Retrieved from: <http://www.niss.gov.ua/articles/993/>. [in Ukrainian]
4. Sokur M.I., Shmandiy B.M., Babets' E.K., Biletsky V.S., Melnikov I.Ye., Kharlamova O.V., Sheludchenko L.S. (2020). *Ekolohichna bezpeka ta ekonomika: monohrafiya* [Ecological safety and economy: monograph]. Kremenchuk. [in Ukrainian]
5. Koblyanska I.I. (2015). *Innovatsiyi yak osnova stratehiyi rehional'noho rozvytku v umovakh perekhodu do «zelenoyi» ekonomiky* [Innovation as the basis of regional development strategy in the transition to a "green" economy]. *Mekhanizm rehulyuvannya ekonomiky* [The mechanism of economic regulation]. № 4. P.17–28. [in Ukrainian]
6. Boyko T.V. *Aktual'ni problemy ekonomichnoyi bezpekы Ukrainy* [Actual problems of economic security of Ukraine] [Electronic resource]. Retrieved from: <http://library.kr.ua/orhus/boyko.pdf>. [in Ukrainian]
7. Khilko M.I. (2017) *Ekolohichna bezpeka Ukrainy: Navchal'nyy posibnyk* [Ecological safety of Ukraine: Tutorial]. Kyiv: Kyiv National University Univ. T. Shevchenko. 267 p. [in Ukrainian]
8. Nosova O.V., Makovoz O.S. (2011) [Models of economic security of the region]. [*Bulletin of the National Law Academy of Ukraine named after Yaroslav the Wise*]. Kharkiv: NLAU named after Yaroslav the Wise. № 4. P. 36–45. [in Ukrainian]
9. Gerasimchuk Z.V., Oleksyuk A.O. (2007) [Ecological safety of the region: diagnostics and support mechanism. *Monograph*]. Lutsk: Nadstyr'ya. – 280 p. [in Ukrainian]
10. Yemets O.O., Chernenko O.O. (2012) *Model' funktsionuvannya rehionu: otsinka ekolohichnoyi bezpekы* [Model of functioning of the region: assessment of ecological safety] *III Vseukrayins'ka naukovo-praktychna konferentsiya «Informatyka ta systemni nauky» (1–3 bereznya 2012 r.)* [III All-Ukrainian scientific-practical conference "Informatics and systems sciences" (March 1-3, 2012)]. P. 80–83. [in Ukrainian]
11. Stoyan Yu. G., Yemets O.O. (1993) *Teoriya i metody evklidovoyi kombinatornoyi optyimizatsiyi* [Theory and methods of Euclidean combinatorial optimization]. Kyiv: Institute for Systems Research in Education. 188 p. [in Ukrainian]

УДК 004.056:004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-4>

Валерій КОРНІЄНКО

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, korniienko.v.i@ntnu.one

ORCID: 0000-0002-0800-3359

Scopus Author ID: 56446921900

Олександра ГЕРАСІНА

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, herasina.o.v@ntnu.one

ORCID: 0000-0002-8196-0657

Scopus Author ID: 55998621600

Дмитро ТИМОФЄЄВ

старший викладач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, tytofieiev.d.s@ntnu.one

ORCID: 0000-0002-9718-6678

Scopus Author ID: 55437340600

Олександр САФАРОВ

кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, safarov.o.o@ntnu.one

ORCID: 0000-0003-1489-2006

Scopus Author ID: 57191867000

Юлія КОВАЛЬОВА

кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, kovalova.yu.v@ntnu.one

ORCID: 0000-0002-9234-4454

Scopus Author ID: 55320891100

Бібліографічний опис статті: Корнієнко, В., Герасіна, О., Тимофєєв, Д., Сафаров, О., Ковальова, Ю. (2022). Ідентифікація та прогнозування самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж для систем виявлення атак. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 20–29, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-4>

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ СИСТЕМ ВІЯВЛЕННЯ АТАК

У роботі визначена актуальність розробки та вдосконалення систем виявлення вторгнень, головним завданням яких є розпізнавання мережевих атак, спроб несанкціонованого доступу та використання ресурсів мережі. Ця проблема вирішується шляхом використання засобів моніторингу, здатних аналізувати трафік мережі в режимі реального часу. Для цього сформульовано математичну задачу структурно-параметричної ідентифікації та прогнозування трафіку в інформаційно-комунікаційних мережах. Шляхом моделювання на основі експериментальних даних показана ефективність розв'язання задачі структурно-параметричної ідентифікації трафіка із використанням глобальних методів оптимізації та інтелектуальних базисних функцій. Доведена ефективність використання блочно-орієнтованих структур шуканих моделей та адаптивних нечітких алгоритмів при розв'язанні задачі прогнозування трафіку. Перевірена та підтверджена адекватність отриманих моделей мережевого трафіку експериментальним даним.

Метою роботи є дослідження та обґрунтування прогнозуючих моделей мережевого самоподібного трафіку для виявлення його аномалій при використанні в системах виявлення та запобігання атак.

Методологія вирішення поставленого завдання полягає у комплексному використанні методів систем штучного інтелекту (нейронних мереж, систем нечіткого висновку, нечіткої кластеризації), структурних (еволюційних, пошукових) та параметричних (градієнтних, квазіньютонівських) методів оптимізації, статистичних методів обробки модельних та експериментальних даних, адекватних закономірностям сучасного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж, що має самоподібний характер.

Наукова новизна. Обґрунтовано методику структурно-параметричної ідентифікації і прогнозування самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж, що включає композицію методів глобальної і локальної оптимізації, а також вибір блочно-орієнтованих структур моделей, яка дозволяє підвищити ймовірність визначення вторгнень для систем виявлення атак за рахунок зниження похибок прогнозуючих моделей самоподібного трафіка.

Висновки. Сформульована математична задача структурно-параметричної ідентифікації та прогнозування трафіку в інформаційно-комунікаційних мережах.

Ключові слова: ідентифікація, прогнозування, самоподібний трафік, інформаційно-комунікаційна мережа, виявлення атак.

Valerii KORNIENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, korniienko.v.i@nmu.one

ORCID: 0000-0002-0800-3359

Scopus Author ID: 56446921900

Oleksandra GERASINA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, herasina.o.v@nmu.one

ORCID: 0000-0002-8196-0657

Scopus Author ID: 55998621600

Dmytro TYMOFIEIEV

Senior Lecturer of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, tymofieiev.d.s@nmu.one

ORCID: 0000-0002-9718-6678

Scopus Author ID: 55437340600

Oleksandr SAFAROV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, safarov.o.o@nmu.one

ORCID: 0000-0003-1489-2006

Scopus Author ID: 57191867000

Yuliia KOVALOVA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, 19 Dmytra Yavornytskoho ave., Dnipro, Ukraine, 49005, kovalova.yu.v@nmu.one

ORCID: 0000-0002-9234-4454

Scopus Author ID: 55320891100

To cite this article: Korniienko, V., Gerasina, O., Tymofieiev, D., Safarov, O., Kovalova, Yu. (2022). Idenyfikatsiia ta prohnozuvannia samopodibnoho trafiku informatsiino-komunikatsiinykh merezh dlia system vyivlennia atak [Identification and prediction of self-similar traffic of information and communication networks for attack detection systems]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 20–29, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-4>

IDENTIFICATION AND PREDICTION OF SELF-SIMILAR TRAFFIC OF INFORMATION AND COMMUNICATION NETWORKS FOR ATTACK DETECTION SYSTEMS

The urgency of development and improvement of intrusion detection systems is determined in the work, the main task of which is to recognize network attacks, attempts of unauthorized access and use of network resources. This problem is solved by using monitoring tools that can analyze real-time network traffic. For this purpose the mathematical problem of structural-parametric identification and forecasting of traffic in information and communication networks is formulated. The efficiency of solving the problem of structural-parametric identification of traffic using global optimization methods and intelligent basic functions is shown by modeling on the basis of experimental data. The efficiency of using block-oriented structures of the required models and adaptive fuzzy algorithms in solving the problem of traffic forecasting is proved. The adequacy of the obtained models of network traffic with experimental data is checked and confirmed.

The aim of the work is to study and substantiate predictive models of network self-similar traffic to detect its anomalies when used in systems to detect and prevent attacks.

The methodology of solving this problem is the integrated use of methods of artificial intelligence systems (neural networks, fuzzy inference systems, fuzzy clustering), structural (evolutionary, exploratory) and parametric (gradient, quasi-Newtonian) optimization methods, statistical methods for modeling and experimental data. modern traffic of information and communication networks, which has a self-similar nature.

Scientific novelty. The method of structural-parametric identification and forecasting of self-similar traffic of information and communication networks is substantiated, which includes the composition of global and local optimization methods, as well as the choice of block-oriented model structures, which allows to increase the probability of traffic.

Conclusions. The mathematical problem of structural-parametric identification and forecasting of traffic in information and communication networks is formulated.

Key words: identification, prediction, self-similar traffic, information and communication network, detection of attacks.

Актуальність проблеми. Розвиток інформаційно-комунікаційних систем і мереж (ІКМ) та інформаційних технологій супроводжується проблемами безпеки мережевих ресурсів.

Одним із рішень актуальної задачі захисту ІКМ від кібератак є розробка та вдосконалення систем виявлення та запобігання атак (СВА) (Лукова-Чуйко, Наконечний, Толюпа, Зюбіна, 2020; Браницкий, Котенко, 2016; Носенко, Півторак, Ліхоузова, 2014), головне завдання яких полягає у виявленні мережевих атак, спроб несанкціонованого доступу і використання ресурсів мережі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мета функціонування СВА зводиться до оперативного виявлення вторгнень в ІКМ та запровадження ефективного захисного сценарію щодо припинення факту порушення конфіденційності, доступності та цілісності інформаційних ресурсів та сервісів (Довбешко, Толюпа, Шестак, 2019).

Наразі сформувались два напрямки протидії вторгнень: виявлення зловживань та виявлення аномалій (Довбешко, Толюпа, Шестак, 2019; Лазаренко, 2015). При виявленні мережевих аномалій (Браницкий, Котенко, 2016) даними для аналізу є мережевий трафік, представлений як інтенсивність (швидкість) передачі даних або набір мережевих пакетів, в загальному випадку фрагментованих на рівні IP. Дані можуть бути агреговані за певний часовий інтервал і нормалізовані, по ним оцінюються

характеристики (набір ознак) трафіку. Створений набір ознак порівнюється з набором характеристик нормальної діяльності об'єкта (користувача або системи) – шаблоном нормальної поведінки. Якщо спостерігається суттєва розбіжність порівнюваних наборів, то фіксується мережева аномалія. В іншому випадку відбувається уточнення шаблону нормального трафіку за допомогою зміни параметрів його настройки з урахуванням поточного спостережуваного профілю мережевої активності. При цьому рішення о стані ІКМ приймається, зазвичай, за статистичними правилами (критеріями) (Браницкий, Котенко, 2016; Довбешко, Толюпа, Шестак, 2019; Лазаренко, 2015; Смирнов, Дрейс, Даниленко, 2014).

Для визначення шаблону нормальної поведінки перспективним є використання моделей захисту на основі розпізнавання аномалій в ІКМ (Гулак, Семко, Складанний, 2015; Бекедова, Ахметов, Корченко, Лахно, 2016; Петров, Корченко, Лахно, 2015; Карачанская, Соседова, 2019), оскільки поточний трафік є реалізацією випадкового процесу, а його адекватна модель – статистично стійка закономірність цього процесу.

Трафік в ІКМ є нелінійним стохастичним процесом з властивостями самоподоби та з хаотичною і фрактальною динамікою. Крім того, встановлено, що агрегований трафік від різних джерел на малих часових масштабах проявляє мультифрактальний характер (Корнієнко,

Гусев, Герасіна, 2020; Riedi, Crouse, Ribeiro, Baraniuk, 1999).

Оцінка характеристик мережевого трафіку необхідна для побудови його адекватної моделі, що дозволяє сформулювати еталонну модель (шаблон) «нормального» трафіку і за нею виявляти аномалії трафіку в СВА. При цьому прогнозування трафіку дозволяє підвищити оперативність виявлення атак.

Таким чином, невирішеною задачею є побудова адекватних прогнозуючих моделей мережевого самоподібного трафіку, які б дозволяли їх використання в СВА для виявлення мережових аномалій в реальному масштабі часу з достатньою ефективністю відносно похибок і достовірності та підвищеною оперативністю.

Мета статті: дослідження та обґрунтування прогнозуючих моделей мережевого самоподібного трафіку для виявлення його аномалій при використанні в системах виявлення та запобігання атак.

Виклад основного матеріалу.

Задача структурно-параметричної ідентифікації та прогнозування трафіку. Сформулюємо цю задачу таким чином: на підставі експериментальної множини функцій (часових рядів) виходу процесу і його статистичних характеристик в умовах завад визначити структуру (узагальнену функцію Φ) і вектор параметрів a прогнозуючої моделі виду:

$$\hat{Y}[k+n] = \Phi\{Y[k], w[k], \xi[k], a[k], k\}, \quad (1)$$

що достатньо точно (у сенсі деякого критерію) апроксимують процес відносно вхідних і вихідних величин у всьому функціональному просторі. Тут $Y[k], w[k], \xi[k]$ – відповідно, вектори (матриці) виходу процесу, його статистичних характеристик і шуму до поточного часу k з відповідними глибинами пам'яті; n – глибина прогнозу (для компенсації чистого запізнення і часу на реакцію СВА). Вважаємо, що оцінка стану процесу (1) виконується за допомогою відповідних фільтрів спостереження.

Формування вектора $I_s = \{\Phi, a\}$ оцінки структури Φ (структурна ідентифікація) і параметрів a (параметрична ідентифікація) моделі (1) здійснюється на основі векторів сигналів спостереження шляхом мінімізації прийнятого функціонала:

$$J[I_s] \rightarrow \min_{I_s \in S} J \Rightarrow I_s^{opt} = \{\Phi_{opt}, a_{opt}\}, \quad (2)$$

де S – обмеження.

При розв'язанні задачі (2) мають бути визначені (обрані):

- ефективні методи оптимізації;
- зміст критерію (функціонала) J ;

- засоби врахування обмежень S ;
- тип структури моделі;
- базисні функції.

Для структурної ідентифікації ефективними вважаються зовнішні критерії (функціонали J), що адекватні задачі побудови моделей із мінімальною дисперсією похибки прогнозу, які поділяються на критерії регулярності і критерії незміщеності (мінімуму зсуву) (Корнієнко, Гусев, Герасіна, 2020).

До критеріїв регулярності відноситься критерій мінімуму відносної похибки покрокового інтегрування:

$$J_e = \frac{\|Y^*[k+n] - \hat{Y}[k+n]\|}{\|Y^*[k+n]\|}, \quad (3)$$

який обчислюється на всій вибірці експериментальних даних N . Він чутливий до рівня шуму у вхідних даних і при збільшенні завад його мінімум зміщується в область простіших моделей.

Стійкіші до завад критерії незміщеності. Наприклад, критерій мінімуму зсуву, заснований на аналізі рішень, має вигляд:

$$J_{cm} = \frac{\|\hat{Y}_A[k+n] - \hat{Y}_B[k+n]\|}{\|Y^*[k+n]\|}, \quad (4)$$

де $\hat{Y}_A[k+n]$ і $\hat{Y}_B[k+n]$ – виходи моделей, навчених на вибірках A і B , відповідно. Тут обчислення зсуву здійснюється на всій вибірці $N = A + B$.

Структурно-параметрична ідентифікація трафіку.

Моделювання розв'язання задачі структурно-параметричної ідентифікації виконувалося на основі експериментальних даних трафіку, що передається через мережу Інтернет (Архів трафіку). Дані являють собою залежність розміру Ethernet кадрів в байтах від часу. Для їх нормування по часовій осі була проведена процедура агрегації з кроком 5 с.

Глибина прогнозу була прийнята 1 такт (5 с), а глибина пам'яті за різними входами від 1 до 4. В якості критерію структурної оптимізації обраний критерій зсуву (4). У якості глобальних методів оптимізації застосовувалися: генетичний алгоритм (ГА), ГА з багатокритеріальною оптимізацією (БО), прямий випадковий пошук (ПВП), метод імітації відпалу (МІВ) та метод порогового прийняття (МПП) (Корнієнко, Гусев, Герасіна, 2020). При цьому використовувалася структура моделей Гаммерштейна-Вінера з базисними функціями у вигляді нейронних мереж (НМ) прямого розповсюдження (ПР), НМ із радіальними базисними функціями (РБФ)

і адаптивної системи нейронечіткого висновку (Anfis) (Корнієнко, Гусев, Герасіна, 2020).

Результати глобальної оптимізації структури моделі трафіку в ІКМ наведені на рис. 1.

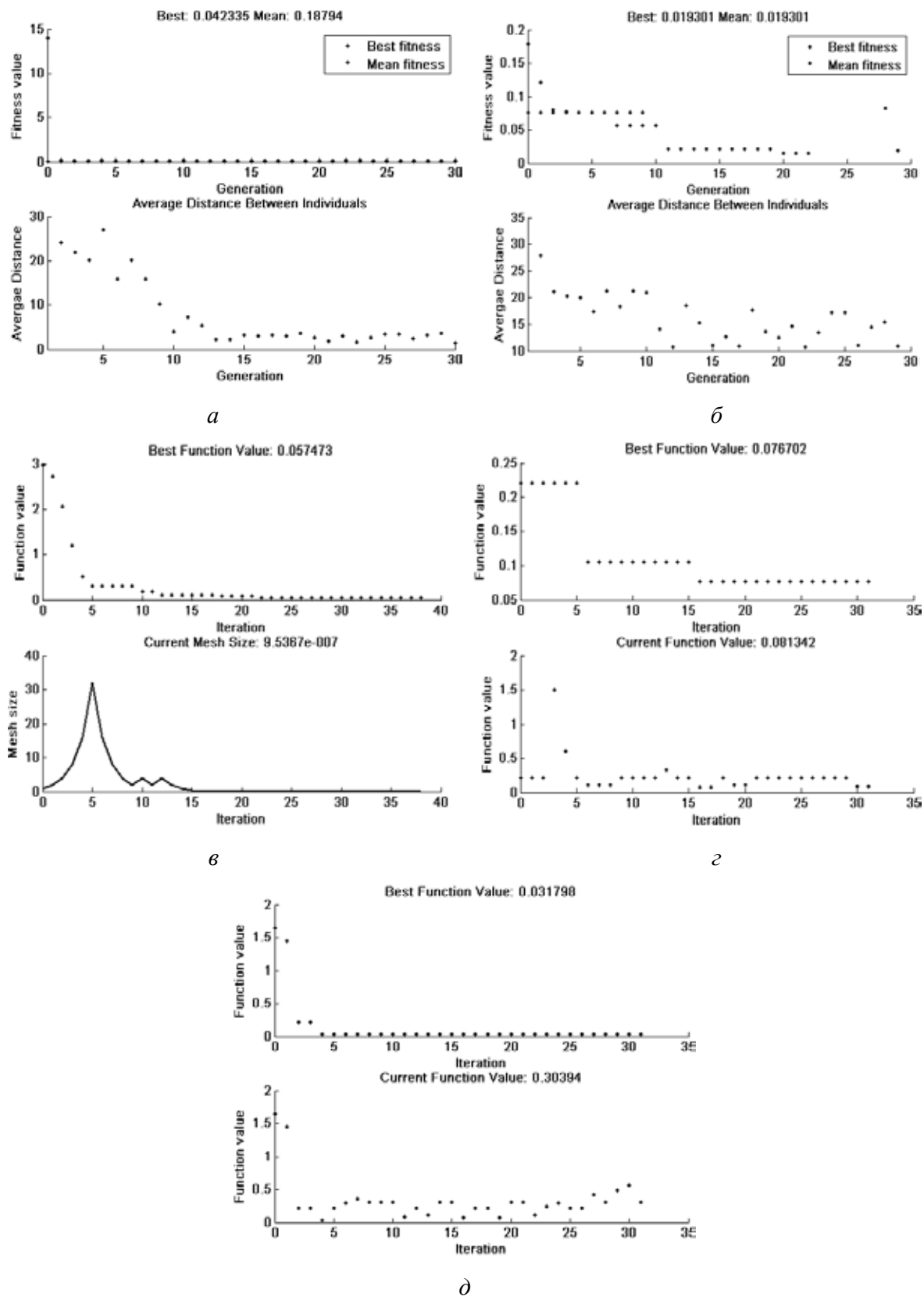


Рис. 1. Результати глобальної оптимізації структури моделі трафіку за допомогою ГА (а), БО (б), ППС (в), МІВ (г) і МПП (д)

Метод БО використовував ГА для знаходження оптимальних за Парето рішень, ПВП мав адаптивний крок пошуку і повний пошук навколо поточної ітерації, МІВ та МПП – обмежену область перевідпалу, ГА – одноточкове схрещування, селективний вибір батьків, формування нової популяції з витісненням. Кількість ітерацій для ПВП, МПП і МІВ (для ГА і БО покоління) обмежувалося на рівні 100, а розмір простору пошуку для ПВП (для ГА і БО розмір популяції, для МПП і МІВ розмір області перевідпалу) – 30.

При глобальній оптимізації варіювалися наступні структурні характеристики моделі:

- тип базисної функції – НМНР, НМ із РБФ і Anfis;
- кількість нейронів в прихованому шарі;
- тип функції активації та структура прихованого шару;
- тип алгоритму параметричної оптимізації.

В результаті моделювання (див. рис. 1) встановлено, що ГА має найвищу швидкість збіжності (ГА виходить в область оптимальних рішень на перших поколіннях, МПП – в середньому після 5 ітерацій, МІВ – після 15, а БО і ПВП – після 20 ітерацій). Алгоритм МПП виявив найкращу швидкодію (0,6 с на ітерацію при 0,7 с на ітерацію в МІВ, 2,2 с на ітерацію в ПВП, 19,3 с на покоління в ГА і 27,4 с на покоління в БО).

Алгоритм БО виявив найкращу збіжність (значення критерію похибки на перевірочній

послідовності (3) склало 0,019 при його використанні, на відміну від 0032 – при МПП, 0,042 – при ГА, 0,057 – при ПВП і 0,077 – при МІО).

Результат параметричної ідентифікації трафіку в ІКМ наведено на рис. 2.

Встановлено, що мінімуму критерію зсуву (5) відповідають базисні функції у вигляді каскадної НМНР. При цьому кількість нейронів в прихованому шарі становить 73, функція активації прихованого шару – конкуруюча з м'яким максимумом, вихідного шару – лінійна, алгоритм навчання НМ – градієнтний спуск з вибором параметра швидкості настроювання.

За міру точності параметричної ідентифікації моделі оптимальної структури використовувався критерій похибки (3), значення якого склало – 0,0311.

Адекватність отриманої інтелектуальної прогнозуючої моделі трафіку перевірялась за непараметричним критерієм знаків. Було встановлено, що для рівня значущості 0,01 розроблена модель з ідентифікованими структурою і параметрами адекватна експериментальним реалізаціям.

Моделювання трафіку із використанням блочно-орієнтованих структур. Глибина прогнозу була прийнята 3 такти, а глибина пам'яті за різними входами від 1 до 4. Як критерій оцінки моделей обрано критерій мінімуму зсуву (4).

Як типи структур розглядалися (табл. 1) моделі: Гамерштейна-Вінера; авторегресійна ARX; Вінера і Гамерштейна з базисними функці-

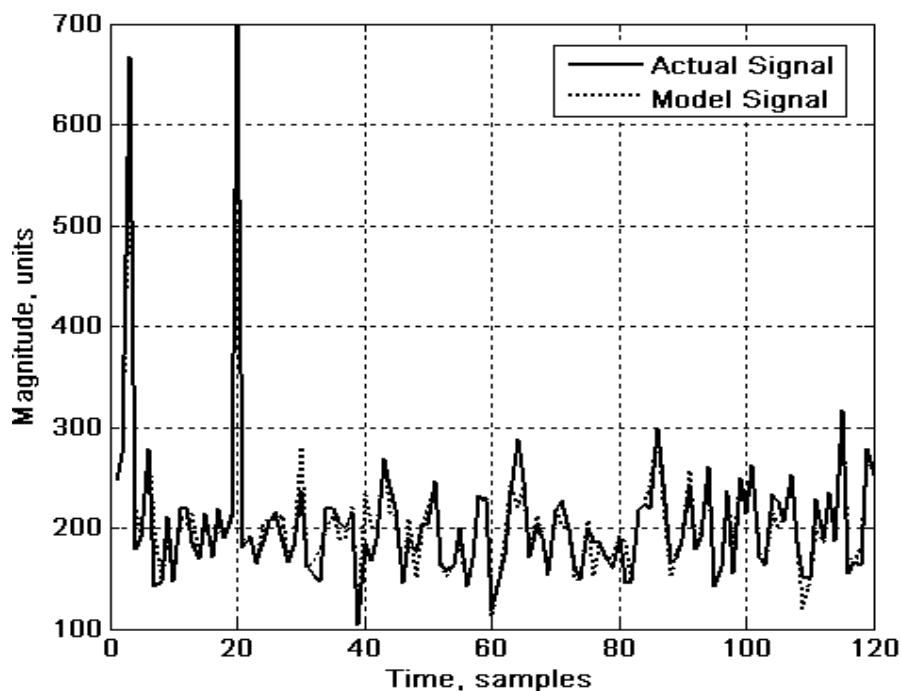


Рис. 2. Результат ідентифікації трафіку

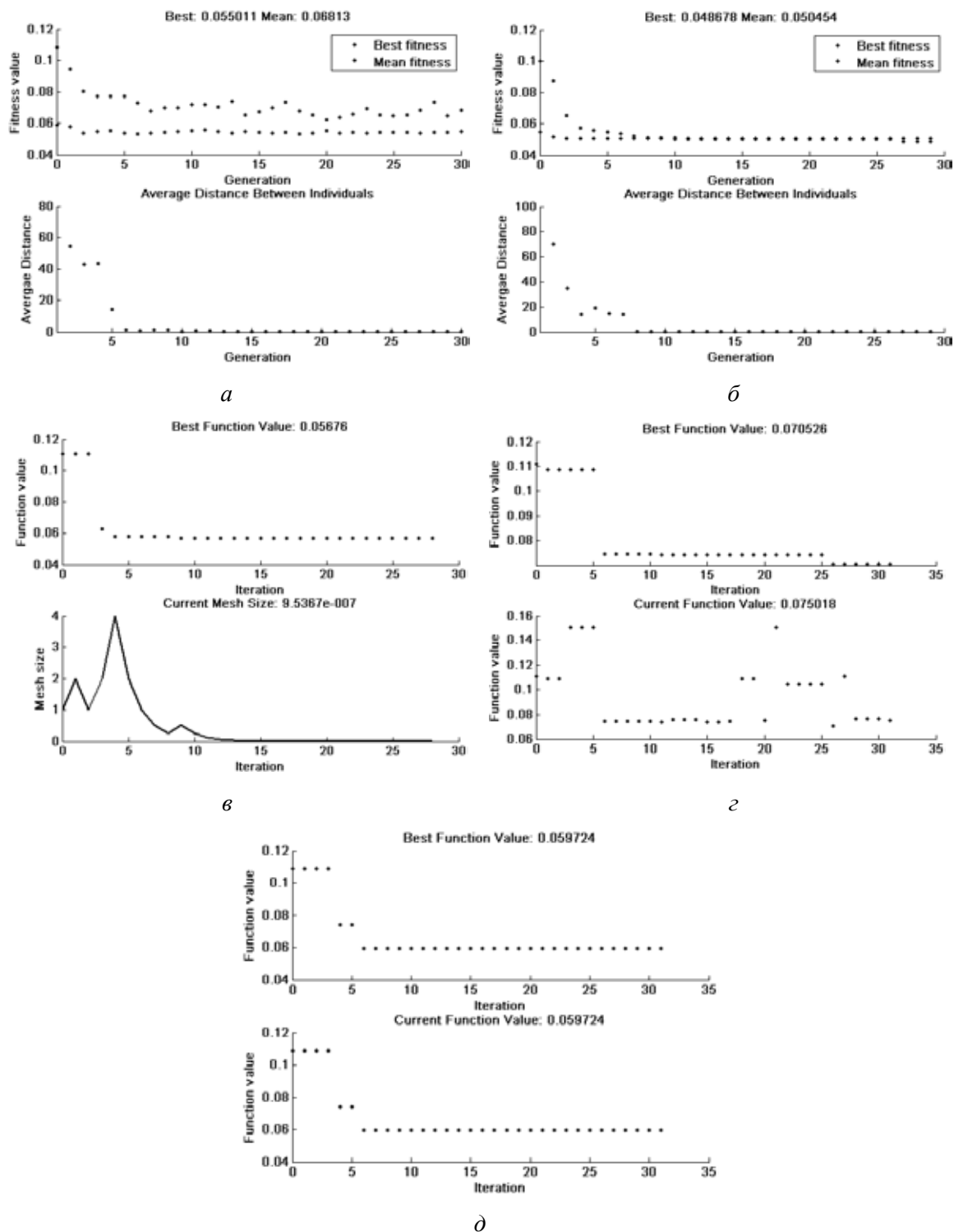


Рис. 3. Результати глобальної оптимізації структури і параметрів моделей для прогнозування трафіку за допомогою ГА (а), МО (б), ПВП (в), МІВ (г) і МПП (д)

Таблиця 1

Похибки незміщеності моделей, відн. од.

Базисна функція	Тип структури моделі			
	Гамерштейна-Вінера	ARX	Вінера	Гамерштейна
Каскадна НМППР		0,0619		
Вейвнет	0,0682	0,0679	0,0631	
Поліном Колмогорова-Габора	0,1004			0,1262

ями у вигляді каскадної НМПР; вейвнету і поліному Колмогорова-Габора (Корнієнко, Гусев, Герасіна, 2020).

Із цієї таблиці видно, що перевагу (у сенсі критерію мінімуму зсуву (4)) мають мережеві базисні функції (каскадна НМПР та вейвнет).

Час обчислень на комп'ютері з процесором Pentium IV за моделями Гамерштейна-Вінера, Вінера і Гамерштейна становить 7-10 мс на цикл прогнозу, а по ARX – 0,2 мс, що не вносить часових обмежень на застосування цих моделей для ідентифікації трафіка в ІКМ.

Адекватність отриманих моделей мережевого трафіку була перевірена і підтверджена за непараметричним критерієм знаків з рівнем значущості 0,01.

Адаптивне нечітке прогнозування трафіку.

Глибина прогнозу була прийнята у 4 такти, а глибина пам'яті за різними входами від 1 до 4. Результати глобальної оптимізації для знаходження оптимальної структури (типу) і параметрів базисних функцій наведені на рис. 3.

У якості глобальних методів оптимізації застосовувалися ГА, БО, ПВП, МІВ і МПП зі значеннями параметрів настроювання, наведеними вище.

Як критерій параметричної оптимізації використовувався критерій регулярності (3), який вираховується на перевірочній вибірці, а для структурної – критерій зсуву (4).

При глобальній оптимізації варіювалися наступні структурні характеристики:

- тип базисної функції – Anfis, нечіткі апроксиматори з субтрактивною кластеризацією (Genfis2) і кластеризацією с-середніх (Genfis3);

- для Anfis – кількість нейронів в прихованому шарі, його тип функцій належності і тип алгоритму параметричної оптимізації;

- для Genfis2 – діапазон впливу кластерного центру;

- для Genfis3 – алгоритм нечіткої логіки (Мамдані або Сугено) і кількість кластерів, що визначає число правил і функцій належності.

В результаті моделювання встановлено, що ГА має найкращу швидкість збіжності (ГА виходить в область оптимальних рішень на перших поколіннях, БО, МПП і ПВП – в середньому після 10 ітерацій, МІВ – після 25 ітерацій).

Алгоритм МІВ виявив найкращу швидкодію (1,9 с на ітерацію при 3 з на ітерацію в МПП, 7,8 с на ітерацію в ПВП, 17,3 с на покоління в ГА і 21,2 с на покоління в БО). При цьому алгоритм БО виявив найкращу збіжність (значення критерію незміщеності (4) при його використанні склали 0,049, на відміну від 0,055 при ГА, 0,057 при ПВП, 0,06 при МПП і 0,07 при МІВ).

Результат прогнозування трафіку в ІТМ наведено на рис. 4.

Встановлено, що мінімуму критерію регулярності відповідають моделі Genfis2 з діапазоном впливу кластерного центру рівним 0,31. Значення критерію параметричної оптимізації склали 0,0329.

Адекватність отриманих моделей мережевого трафіку була перевірена і підтверджена за непараметричним критерієм знаків з рівнем значущості 0,01.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. Сформульована математична

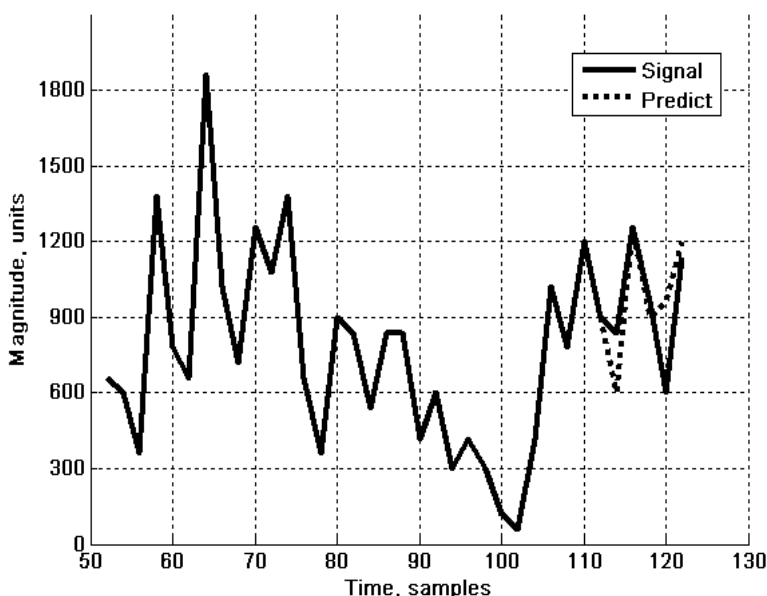


Рис. 4. Результат прогнозування мережевого трафіку

задача структурно-параметричної ідентифікації та прогнозування трафіку в інформаційно-комунікаційних мережах.

Шляхом моделювання на основі експериментальних даних показана ефективність розв'язання задачі структурно-параметричної ідентифікації трафіка із використанням глобальних методів оптимізації та інтелектуальних базисних функцій (нейромереж та систем нечіткого висновку). Доведена ефективність використання блочно-орієнтованих струк-

тур шуканих моделей та адаптивних нечітких алгоритмів при розв'язанні задачі прогнозування трафіку.

Перевірена та підтверджена адекватність отриманих моделей мережевого трафіку експериментальним даним.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на обґрунтування та дослідження інформативності характеристик і моделей трафіку та ефективності критеріїв та методів розпізнавання атак.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Лукова-Чуйко Н., Наконечний В., Толюпа С., Зюбіна Р. Проблеми захисту критично важливих об'єктів інфраструктури. *Безпека інформаційних систем і технологій*. 2020. № 1(2). С. 31-39.
2. Браницкий А.А., Котенко И.В. Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак. *Труды СПИИРАН*. 2016. Вып. 2(45). С. 207-244. URL: www.proceedings.spiiras.nw.ru.
3. Носенко К.М., Півторак О.І., Ліхоузова Т.А. Обзор систем выявления атак в сетевом трафике. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління»*. 2014. № 1(24). С. 67-75.
4. Довбешко С.В., Толюпа С.В., Шестак Я.В. Застосування методів інтелектуального аналізу даних для побудови систем виявлення атак. *Сучасний захист інформації*. 2019. № 1(37). С. 6-15.
5. Лазаренко С.В. Особенности функционирования систем выявления атак на автоматизованные системы. *Сучасний захист інформації*. 2015. № 1. С. 33-40.
6. Смирнов А., Дрейс Ю., Даниленко Д. Имитационная модель NIPDS для обнаружения и предотвращения вторжений в телекоммуникационных системах и сетях. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2014. Vol. 20. Issue 1. P. 29-35.
7. Гулак Г.М., Семко В.В., Складанний П.М. Модель системи виявлення вторгнень з використанням двоступеневого критерію виявлення мережевих аномалій. *Сучасний захист інформації*. 2015. № 4. С. 81-85.
8. Бекетова Г., Ахметов Б., Корченко А., Лахно В. Разработка модели интеллектуального распознавания аномалий и кибератак с использованием логических процедур, базирующихся на покрытиях матриц признаков. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2016. Vol. 22. Issue 3. P. 242-254. DOI: 10.18372/2225-5036.22.11096.
9. Петров О., Корченко О., Лахно В. Метод та модель інтелектуального розпізнавання загроз інформаційно-комунікаційному середовищу транспорту. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*. 2015. Vol. 21. Issue 1. P. 26-34.
10. Карачанская Е.В., Соседова Н.И. Метод выявления аномалий сетевого трафика, основанный на его самоподобной структуре. *Безопасность информационных технологий*. 2019. С. 98-110. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1185>. Doi: <http://dx.doi.org/10.26583/bit/2019.1.10>.
11. Корнієнко В.І., Гусев О.Ю., Герасіна О.В. Інтелектуальне моделювання нелінійних динамічних процесів у системах керування, кібербезпеки, телекомунікацій: підручник. *Дніпро: НТУ «ДП»*. 2020. 536 с.
12. Riedi R.H., Crouse M.S., Ribeiro V., Baraniuk R.G. A multifractal wavelet model with application to network traffic. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1999. Vol. 45. P. 992-1018.
13. Архів трафіку. URL: <http://ita.ee.lbl.gov>.

REFERENCES:

1. Lukova-Chuiko, N., Nakonechnyi, V., Toliupa, S., Ziubina, R. (2020). Problemy zachystu krytychno vazhlyvykh ob'ektiv infrastruktury [Problems of protection of critical infrastructure facilities]. *Bezpeka informatsiynykh system i tekhnolohii*. – *Security of information systems and technologies*, 1(2), 31-39 [in Ukrainian].
2. Branitskii, A.A., Kotenko, I.V. (2016). Analiz i klassifikaciya metodov obnaruzheniya setevykh atak [Analysis and classification of network attack detection methods]. *Trudy SPIIRAN*. – *Proceedings of SPIIRAS*, 2(45), 207-244 [in Russian]. URL: www.proceedings.spiiras.nw.ru.
3. Nosenko, K.M., Pivtorak, O.I., Lichouzova, T.A. (2014). Ohliad system vyjavlennia atak v merezhevomu trafiku [Overview of network traffic attack detection systems]. *Mizhvidomchyi nauково-tekhnichnyi zbirnyk*

«Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnia». – *Interdepartmental scientific and technical collection "Adaptive automatic control systems"*, 1(24), 67-75 [in Ukrainian].

4. Dovbeshko, S.V., Toliupa, S.V., Shestak, Ya.V. (2019). Zastosuvannya metodiv intelektualnoho analizu danykh dlia pobudovy system vyjavlennia atak [Application of data mining methods to build attack detection systems]. *Suchasnyi zakhyst informatsii. – Modern information protection*, 1(37), 6-15 [in Ukrainian].

5. Lazarenko, S.V. (2015). Osoblyvosti funktsionuvannya system vyjavlennia atak na avtomatyzovani systemy [Features of functioning of systems of detection of attacks on automated systems]. *Suchasnyi zakhyst informatsii. – Modern information protection*, 1, 33-40 [in Ukrainian].

6. Smirnov, A., Dreis, Yu., Danylenko, D. (2014). Imitacionnaya model' NIPDS dlya obnaruzheniya i predotvrashcheniya vtorzhenij v telekommunikacionnyh sistemah i setyah [NIPDS simulation model for intrusion detection and prevention in telecommunications systems and networks]. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security. – Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 20, 1, 29-35 [in Russian].

7. Hulak, H.M., Semko, V.V., Skladannyi, P.M. (2015). Model systemy vyjavlennia vtorhnen z vykorystanniam dvostupenevoho kryteriiu vyjavlennia merezhevykh anomalii [Model of the system for detecting intrusion based on the two-stage criterion for detecting fencing anomalies]. *Suchasnyi zakhyst informatsii – Modern information protection*, 4, 81-85 [in Ukrainian].

8. Beketova, G., Ahmetov, B., Korchenko, A., Lahno, V. (2016). Razrabotka modeli intellektual'nogo raspoznavaniya anomalij i kiberatak s ispol'zovaniem logicheskikh procedur, baziruyushchihsia na pokrytyiah matric priznakov [Development of a model for intelligent recognition of anomalies and cyberattacks using logical procedures based on coverage of feature matrices]. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security. – Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 22, 3, 242-254 [in Russian]. DOI: 10.18372/2225-5036.22.11096.

9. Petrov, O., Korchenko, O., Lakhno, V. (2015). Metod ta model intelektualnoho rozpiznavannia zahroz informatsiino-komunikatsiinomu seredovishchu transportu [Method and model of intellectual recognition of threats to the information and communication environment of transport]. *Ukrainian Scientific Journal of Information Security. – Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, 21, 1, 26-34 [in Ukrainian].

10. Karachanskaya, E.V., Sosedova, N.I. (2019). Metod vyyavleniya anomalij setevogo trafika, osnovannyj na ego samopodobnoj structure [A method for detecting network traffic anomalies based on its self-similar structure]. *Bezopasnost' informacionnyh tekhnologij. – Information technology security*, 98-110 [in Russian]. URL: <https://bit.mephi.ru/index.php/bit/article/view/1185>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit/2019.1.10>.

11. Korniienko, V.I., Husiev, O.Yu., Herasina, O.V. (2020). Intelektualne modeliuвання nelineinykh dynamichnykh protsesiv u systemakh keruvannya, kiberbezpeky, telekomunikatsii: pidruchnyk [Intelligent modeling of nonlinear dynamic processes in control systems, cybersecurity, telecommunications: a textbook]. *Dnipro: NTU «DP».* – *Dnipro: NTU «DP»*, 536 [in Ukrainian].

12. Riedi, R.H., Crouse, M.S., Ribeiro, V., Baraniuk, R.G. (1999). A multifractal wavelet model with application to network traffic [A multifractal wavelet model with application to network traffic]. *IEEE Transactions on Information Theory. – IEEE Transactions on Information Theory*, 45, 992-1018 [in English].

13. Traffic archive [Traffic archive]. URL: <http://ita.ee.lbl.gov>.

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-5>

Георгій КУЛІНЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007, georgv@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8501-5636

Петро ЛЕОНТЬЄВ

кандидат технічних наук, завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007, p.leontiev@ksu.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9494-9078

Scopus Author ID: 57192820868

Андрій ПАНИЧ

асистент кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007, a.panych@ksu.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2511-5763

Арсен САВЕНКО

студент факультету електроніки та інформаційних технологій, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, Україна, 40007, a.savenko@student.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7621-2777

Бібліографічний опис статті: Кулінченко, Г., Леонтєв, П., Панич, А., Савенко, А. (2022). Керування підйомом платформи будівельного принтера. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 30–38, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-5>

КЕРУВАННЯ ПІДЙОМОМ ПЛАТФОРМИ БУДІВЕЛЬНОГО ПРИНТЕРА

Метою роботи є отримання необхідних даних для розробки системи підйому платформи стріли будівельного 3D-принтера, що дозволить підвищити точність позиціонування за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання. Реалізація поставленої мети передбачає вирішення завдань: розробки математичної моделі електромеханічного перетворювача, що забезпечує точне переміщення платформи стріли будівельного 3D-принтера на базі вибраної електричної машини; дослідження взаємозв'язку конструктивно-технологічних параметрів системи підйому; формування засад побудови схеми керування електроприводом та гідроприводом, що забезпечує утримання заданої позиції в підйомних гідроприводах. **Методологія** вирішення поставленого завдання полягає в імітаційному моделюванні процесу переміщення гідроприводів платформи завдяки зміні тиску в гідравлічній системі за допомогою насоса і крокового двигуна в якості приводу. Використані методи теорії автоматичного керування електричними апаратами, перетворень Лапласа, методи теорії електроприводу, електричного та магнітного поля, теорії гідромеханіки і математичного моделювання. **Наукова новизна.** В ході виконання роботи створено методику побудови електроприводу системи підйому платформи будівельного 3D-принтеру і отримання характеристик приводу на основі крокового двигуна в середовищі Matlab/Simulink. **Висновки.** Основним результатом досліджень є підвищення точності позиціонування висоти платформи стріли будівельного 3D-принтера завдяки опрацюванню режимів роботи крокового двигуна у складі електроприводу гідравлічної системи підйому. Розроблена модель каналу керування позиціонуванням стріли будівельного 3D-принтера, досліджені алгоритми керування кроковим двигуном по зміні витрат робочого середовища, продуктивність і точність під час позиціонування платформи стріли. Модель дозволяє впровадити запропоновані методи моделювання для інших контурів керування об'єктом.

Ключові слова: будівельний принтер, гідропривід підйому платформи, кроковий двигун, керування, математична модель.

Heorhii KULINCHENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Computerized Control Systems, Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine, 40007, georgv@ukr.net

ORCID: 0000-0002-8501-5636

Petro LEONTIEV

Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Computerized Control Systems, Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine, 40007, p.leontiev@ksu.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9494-9078

Scopus Author ID: 57192820868

Andrii PANYCH

Assistant Lecturer at the Department of Computerized Control Systems, Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine, 40007, a.panych@ksu.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2511-5763

Arsen SAVENKO

Student at the Faculty of Electronics and Information Technology, Sumy State University, 2 Rimsky-Korsakov str., Sumy, Ukraine, 40007, a.savenko@student.sumdu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7621-2777

To cite this article: Kulinchenko, H., Leontiev, P., Panych, A., Savenko, A. (2022). Keruvannia pidnomom platformy budivelnoho pryntera [Construction printer platform lift control]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 30–38, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-5>

CONSTRUCTION PRINTER PLATFORM LIFT CONTROL

The aim of the work is to obtain the necessary data for the development of the boom platform lifting system of the construction 3D-printer, which will increase the accuracy of positioning by optimizing the operating modes of the equipment. Realization of the set purpose provides the decision of problems: development of mathematical model of the electromechanical converter providing exact movement of a boom platform of the construction 3D-printer on the basis of the chosen electric machine; study of the relationship between structural and technological parameters of the lifting system; formation of bases of construction of the control scheme of the electric drive and the hydraulic drive providing holding of the set position in lifting hydraulic drives. **The methodology** for solving this problem is to simulate the process of moving the hydraulic drives of the platform by changing the pressure in the hydraulic system using a pump and a stepper motor as a drive. Methods of the theory of automatic control of electric devices, Laplace transforms, methods of the theory of electric drive, electric and magnetic field, theory of hydromechanics and mathematical modeling are used. **Scientific novelty.** In the course of the work the method of construction of the electric drive of the lifting system of the construction 3D-printer platform and obtaining the characteristics of the drive based on the stepper motor in the Matlab/Simulink environment was created. **Conclusions.** The main result of the research is to increase the accuracy of positioning the height of the boom platform of the construction 3D-printer by developing the modes of operation of the stepper motor as part of the electric drive of the hydraulic lifting system. A model of the boom positioning control channel of a construction 3D printer has been developed, stepper motor control algorithms for changing the operating medium flow rate, productivity and accuracy during boom platform positioning have been studied. The model allows to implement the proposed modeling methods for other object control loops.

Key words: construction printer, platform lifting hydraulic drive, stepper motor, control, mathematical model.

Актуальність проблеми. Актуальність дослідження полягає в оцінці можливостей забезпечення точності позиціонування платформи стріли будівельного 3D-принтеру за рахунок використання відповідного приводу гідронасосу. Крім того, дослідження методів та каналів керування елементами і апаратами подачі гідравлічної рідини дає змогу оптимізувати параметри механічної частини установки підйому тим самим підвищити точність позиці-

онування, швидкість переміщення, зменшення реакції на зовнішні збурення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Галузь 3D-будівництва почала активно розвиватись тільки в останньому десятиріччі. Відповідно, зараз активно досліджуються і розвиваються технології та обладнання для 3D-будівництва, зокрема засоби автоматизації та інформаційні технології (Edenhofer S., 2016; Labonnote N., 2016). Одним з типів застосо-

уваних будівельних 3D-принтерів є радіальний. Радіальні 3D-принтери відрізняються по типу конструкції від інших будівельних і промислових установок для друкування, схемами керування та методами подавання матеріалу. Однією із основних конструктивно-технологічних відмінностей цього типу принтерів є використання гідравлічної системи підйому стріли. Гідравлічна система підйому стріли складається з гідронасосу зі своїм приводом, телескопічних гідроприводів та гідорозподільників. До параметрів процесу підйому платформи висуваються досить жорсткі вимоги, зокрема точність позиціонування. При недотриманні точності подачі будівельного розчину утворюється зсув кладки, через що знизиться рівень надійності будівлі. Відповідно, основним контуром керування будівельного принтера є система позиціонування, що забезпечує точне переміщення платформи будівельного принтера, на якій знаходиться екструдер із робочою сумішшю. Сукупність характеристик (Кулинченко Г.В., 2013) зумовлює доцільність використання для приводу гідронасосу крокового двигуна (КД). Для покращення характеристик гідроприводу доцільно використати підходи, описані у (Жданов А.В., 2016). Аналізуючи публікації, що присвячені розбудові математичних моделей КД, можна констатувати, що досить ефективний підхід демонструється при використанні моделі КД у просторі станів (Лекомцев П.В., 2020), що дозволяє обчислювати керуючі впливи з урахуванням змінних навантажень на валу КД.

Метою дослідження є отримання необхідних даних для розробки системи підйому платформи стріли будівельного 3D-принтера, що дозволить підвищити точність позиціонування за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання. Реалізація поставленої мети передбачає вирішення завдань: розробки математичної моделі електромеханічного перетворювача, що забезпечує точне переміщення платформи стріли будівельного 3D-принтера на базі

вибраної електричної машини; дослідження взаємозв'язку конструктивно-технологічних параметрів системи підйому; формування засад побудови схеми керування електроприводом та гідроприводом, що забезпечує утримання заданої позиції в підйомних гідроприводах.

Виклад основного матеріалу. Структурну схему агрегату підйому платформи будівельного 3D-принтера можна представити у вигляді, показаному на рис. 1.

Агрегат підйому являє собою мехатронний модуль (Кулинченко Г.В., 2013) та складається з наступних функціональних вузлів: приводний кроковий двигун (КД), шестерінчастий насос (НШ), трубопровід, гідропривод. Частота керуючих імпульсів f_i задає швидкість обертання ω двигуна КД, який обертає насос НШ, в результаті чого під дією тиску гідравлічної рідини P в трубопроводі гідросистеми здійснюється переміщення штоків гідроприводу на висоту підйому платформи. Структурна схема контуру керування по висоті підйому платформи зображена на рис. 2.

Збільшення висоти підйому платформи стріли принтера здійснюється в результаті видачі керуючих сигналів на драйвер КД, який обертає насос НШ, в результаті чого створюється тиск переміщення. Реверс напрямків переміщення здійснюється шляхом перемикавання розподільника P . При зменшенні висоти підйому платформи потрібна швидкість переміщення досягається завдяки керуванню гідравлічним потоком робочою рідиною на злив. Тиск в гідроциліндрі G_c зменшується під дією ваги платформи. Швидкість опускання платформи регулюється з допомогою клапану зливу K_l , що встановлений у трубопроводі зливу.

Критеріями ефективного керування підйомом/опусканням платформи принтера є точність позиціонування та рівномірність переміщення платформи в умовах дії змінних навантажень. Вирішення цих завдань залежить від вирішення часткових задач керування, зокрема:

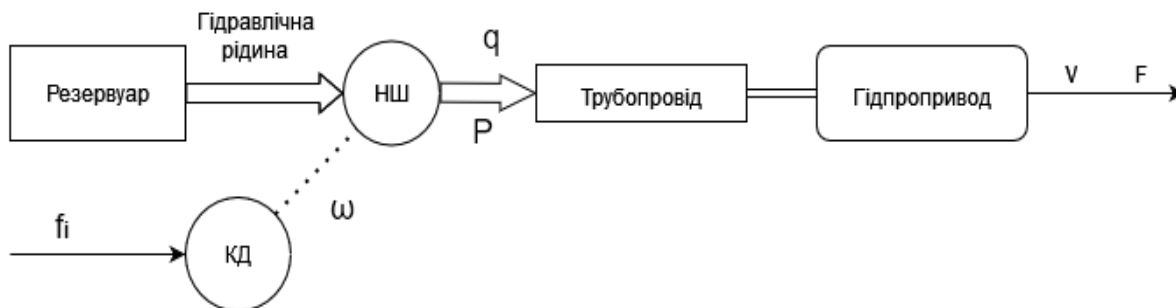


Рис. 1. Структурна схема агрегату підйому платформи

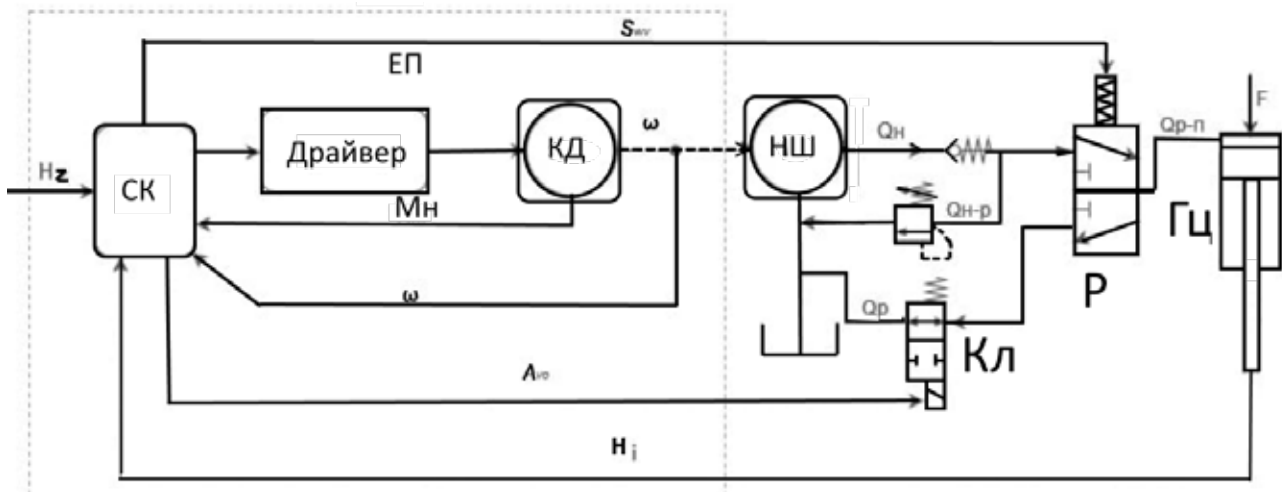


Рис. 2. Структурна схема каналу керування по висоті підйому платформи

- мінімізація інтенсивності зміни пов'язаних параметрів робочої рідини, параметрів трубопроводів, відповідно, гідромеханічних втрат;
- зниження інтенсивності зношування елементів установки з використанням адаптивного регулювання процесів тертя та буксування;
- врахування наслідків комутаційних процесів, які відбуваються в драйвері та засобах електроприводу;
- прогнозування параметрів динамічних процесів, які відбуваються внаслідок перерозподілу механічних навантажень при переміщенні та споживанні будівельної суміші;
- врахування впливу гідравлічної системи на характер електромеханічного навантаження на електричну машину (КД).

Саме намагання забезпечити високу точність позиціонування та мінімізацію інтенсивності зміни механічних параметрів переміщення платформи зумовлюють використання малопотужного приводу. Це дозволяє забезпечити досить точне дозування робочої рідини при необхідності малих переміщень.

Для забезпечення вирішення сформульованих задач в системі керування необхідні дані про реальну швидкість зростання/зменшення навантаження гідросистеми та механізмів, а також синхронізація вмикання/вимикання відповідних клапанів гідросистеми. Саме використання цієї інформації дозволяє реалізувати необхідні стабілізатори навантаження і швидкості.

Як видно із схеми (рис. 2), керування витратами та тиском (зусиллям переміщення) здійснюється з допомогою дроселюючих та розподільчих електромагнітних клапанів. Керуючі сигнали надходять із мікропроцесорної системи

керування, яка дозволяє отримати потрібну динаміку перехідних процесів в результаті обробки сигналів, що надходять від датчиків параметрів установки підйому.

Формування керуючих сигналів для електричних апаратів (електромагнітних клапанів) повинно здійснюватися з урахуванням можливостей виникнення гідравлічних ударів, або, навпаки провалів тиску. Використання в засобах автоматизації приводу розподільного пристрою, який вмикається в контур зворотного зв'язку, дає змогу запобігти провалам тиску та підвищити точність позиціонування (Жданов А.В., 2016). Тому, в процесі керування поряд із завданням перерозподілу робочої рідини гідравлічній системі, вирішується завдання зміни швидкості переміщення штоку гідроциліндра відповідно до значення керуючого впливу. Відповідність досягається з допомогою корегування швидкості обертання насоса дозатора.

Для дослідження динаміки процесів, що відбуваються при переміщенні телескопічної платформи та зміні навантажень, що виникають при зміні маси екструдера в процесі споживання будівельної суміші, з врахуванням схеми рис. 2, побудована модель системи. На рис. 3 представлений загальний вигляд моделі системи підйому платформи, що переміщується електроприводом (ЕП) на базі КД. До складу схеми (рис. 3) входять три підсистеми: система керування (1), механічна система (2) та гідравлічна система (3).

Відповідно до алгоритму обчислення параметрів руху, електромагнітний момент M_E , створюваний обмотками фаз статора, обчислюється за наступною формулою (Лекомцев П.В., 2020):

$$M_E = -\psi_{M1} * i_1 \sin p\Theta - \psi_{M2} * i_2 \sin(\Theta - \lambda), \quad (1)$$

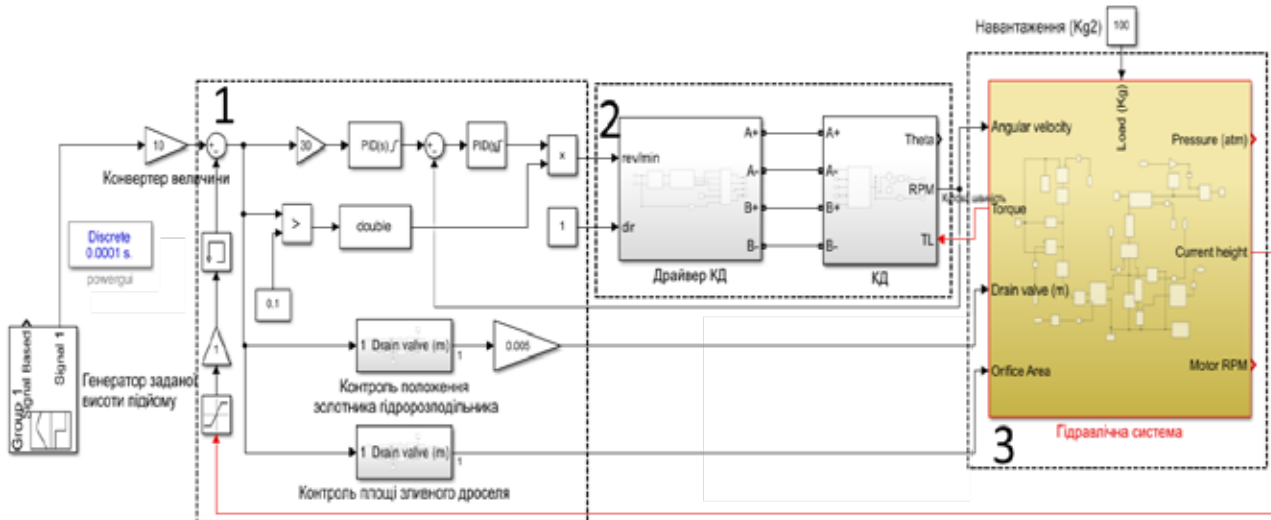


Рис. 3. Модель контуру керування підйомом платформи будівельного принтера

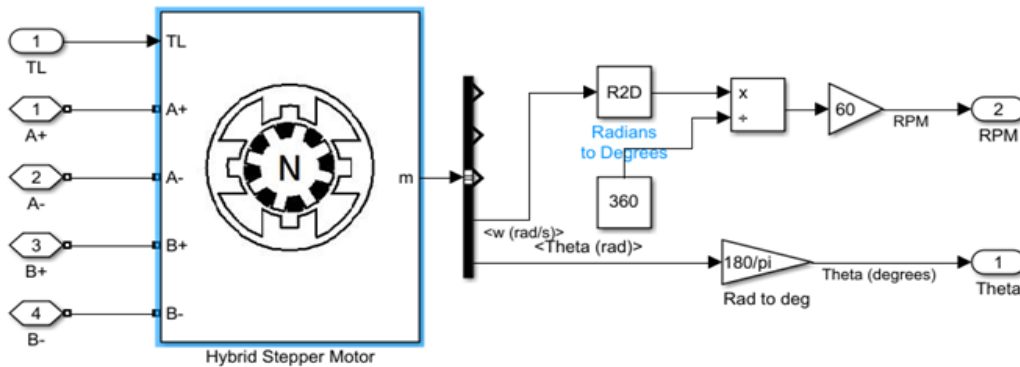


Рис. 4. Модель крокового двигуна

де i_1, i_2 – струми фаз, що протікають по обмотках статора; $\psi_{M1} = \psi_M^* (\sin p\Theta)$ та $\psi_{M2} = \psi_M^* (\sin p(\Theta - \lambda))$ – потокозчеплення фаз; λ – кут кроку полюсів p ; Θ – кут положення ротора.

Рівняння руху електроприводу з урахуванням діючих моментів:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J_\Sigma} (M_E - M_C), \quad (2)$$

де $J_\Sigma = J_p + J_H$ – сумарний момент інерції електроприводу, приведений до валу ротора; p – число пар полюсів; $\omega = d\Theta/dt$ – частота обертання; $M_C = M_H + M_T$ – сумарний момент опору двигуна; M_H – момент опору навантаження; $M_T = D d\Theta/dt$ – момент опору в'язкого тертя (D – коефіцієнт в'язкого тертя).

Приведені співвідношення використовуються при побудові моделі КД в середовищі Matlab/Simulink (рис. 4):

Обов'язковим елементом розбудови електроприводу на базі КД, є використання драйвера, що забезпечує комутацію обмоток КД. Драйвер будується на основі керованого генератора сиг-

налу змінної частоти з використання логічного пристрою. Останній формує імпульси різної довжини, яка відповідає заданому напрямку та швидкості обертання. Модель драйвера КД показана на рис. 5. В схемі вихід драйверу безпосередньо підключений до обмоток КД, що дає змогу контролювати значення струму в обмотках КД та оцінювати навантаження драйвера.

Відповідно до схеми контуру керування підйомом платформи вал КД жорстко зв'язаний з валом шестерінчастого насоса. Відповідно, об'єм подачі рідини в гідравлічну систему визначається пропорційною залежністю від швидкості обертання ω_H . Система рівнянь, що описує функціонування шестерінчастого насоса, буде мати вигляд (Репінський С.В., 2019):

$$M_H = \frac{P_{P-H} \cdot q_H \cdot e_H}{\eta_{ГН}},$$

$$Q_{HK} = q_H \cdot e_H \cdot \omega_H \cdot \eta_{ОН}, \quad (3)$$

$$e_H = q_H / q_{HM},$$

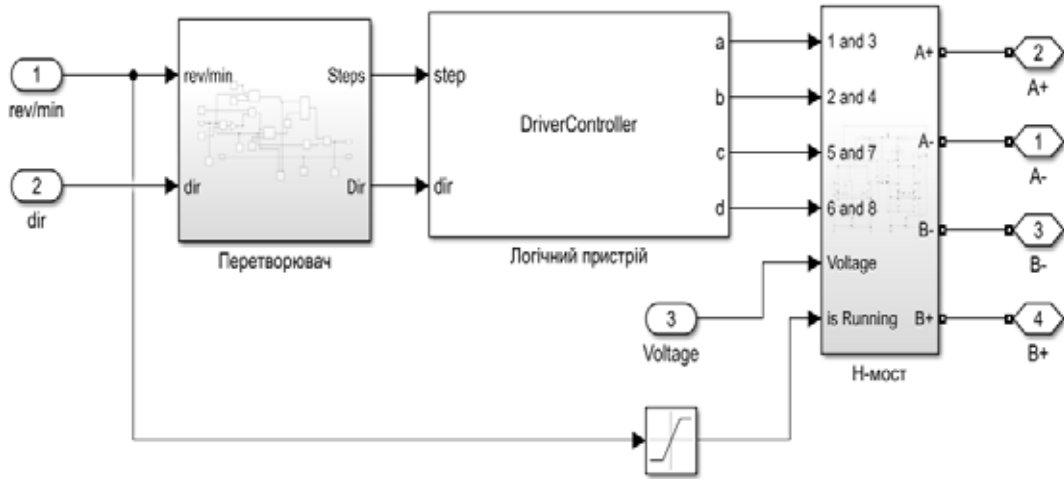


Рис. 5. Модель драйвера крокового двигуна

де Q_{HK} – подача від насоса до клапана розподільника; P_{P-H} – тиск між насосом та гідророзподільником; ω_H – кутова швидкість валу насоса; e_H – параметр регулювання; q_{HM} – максимальний робочий об'єм насоса; q_H – робочий об'єм насоса; M_H – момент навантаження на валу гідронасоса; $\eta_{гн}$, $\eta_{он}$ – ККД насоса, відповідно, механічний та об'ємний.

Витрати робочої рідини через запобіжний клапан:

$$Q_{HP} = Q_{HK} - Q_K, \quad (4)$$

де Q_K – витрати робочої рідини, що проходить через клапан; Q_{HK} – подача між насосом і запобіжним клапаном; Q_{HP} – витрати між насосом і розподільником.

Рівняння витрати рідини на виході розподільника:

$$Q_P = \mu \cdot A_{\partial p} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_H - P_1)} \cdot \text{sign}(P_H - P_1), \quad (5)$$

де $A_{\partial p}$ – площа робочого вікна розподільного золотника; μ – коефіцієнт витрати робочого вікна розподільного золотника; ρ – густина робочої рідини; P_H – поточне значення тиску робочої рідини на виході насоса; P_1 – поточне значення тиску робочої рідини в напірній гідролінії гідроциліндра.

Динаміка гідроциліндра може бути описана (Дусанюк Ж.П., 2015) за допомогою рівняння поступального руху поршня під дією тиску в залежності від зовнішнього навантаження, сухого та в'язкого тертя та рівнянь витрат на вході та виході:

$$Q_{PNC}^n = \frac{dP_{CPH}}{dt} k_{УПРП} + \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{dz}{dt} + k_{ПЕРП} (P_{CPH} - P_{PCU}),$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = (P_{CPH} - P_{PCU}) \cdot \frac{\pi D^2}{4} - \sigma_{\zeta} \frac{dz}{dt} - (R_{TPH} + R_{TPW} + k(P_{CPH} + P_{PCU})) \cdot \text{sign} \frac{dz}{dt} - F, \quad (6)$$

де Q^n – витрати рідини від розподільника до порожнини циліндра, z – переміщення штоку гідроциліндра; m – приведена до штока маса рухомих частин гідроциліндра; D – діаметр поршня; d – діаметр штока; σ_{ζ} – коефіцієнт в'язкого тертя; R_{TPH} та R_{TPW} – сила сухого тертя в ущільненнях відповідно поршня та штока; F – сила навантаження на шток гідроциліндра; $k_{УПР}$ – коефіцієнт пружності порожнин із рідиною; $k_{ПЕРП}$ – коефіцієнт перетікань порожнин з рідиною; $k_{ПЕРШ}$ – коефіцієнт перетікань рідини в порожнинах між штоком і поршнем; P_{CPH} – тиск між циліндром і розподільником; P_{PCU} – тиск між зливним портом розподільника і циліндром.

Для побудови імітаційної моделі гідравлічної системи обрано компоненти із стандартної бібліотеки SimHydraulics та SimMechanic пакета Matlab/Simulink. Модель гідравлічної підсистеми зображена на рис. 6.

Як видно із схеми, модель складається з двох частин: механічної та гідравлічної. У *механічній частині* моделюється взаємодія сил, що діють при підйомі платформи будівельного принтера. Ця взаємодія відображується сукупністю пов'язаних між собою блока додаткової інерції та обертового демпфера. Візуалізація значень механічних параметрів здійснюється з допомогою віртуальних датчиків швидкості обертання валу та датчиків обертового моменту на валу. Блок додаткової інерції дає змогу імітувати дію обертової інерції, яка присутня в реальному прототипі будівельного 3D-принтера. З допомогою віртуальних датчиків

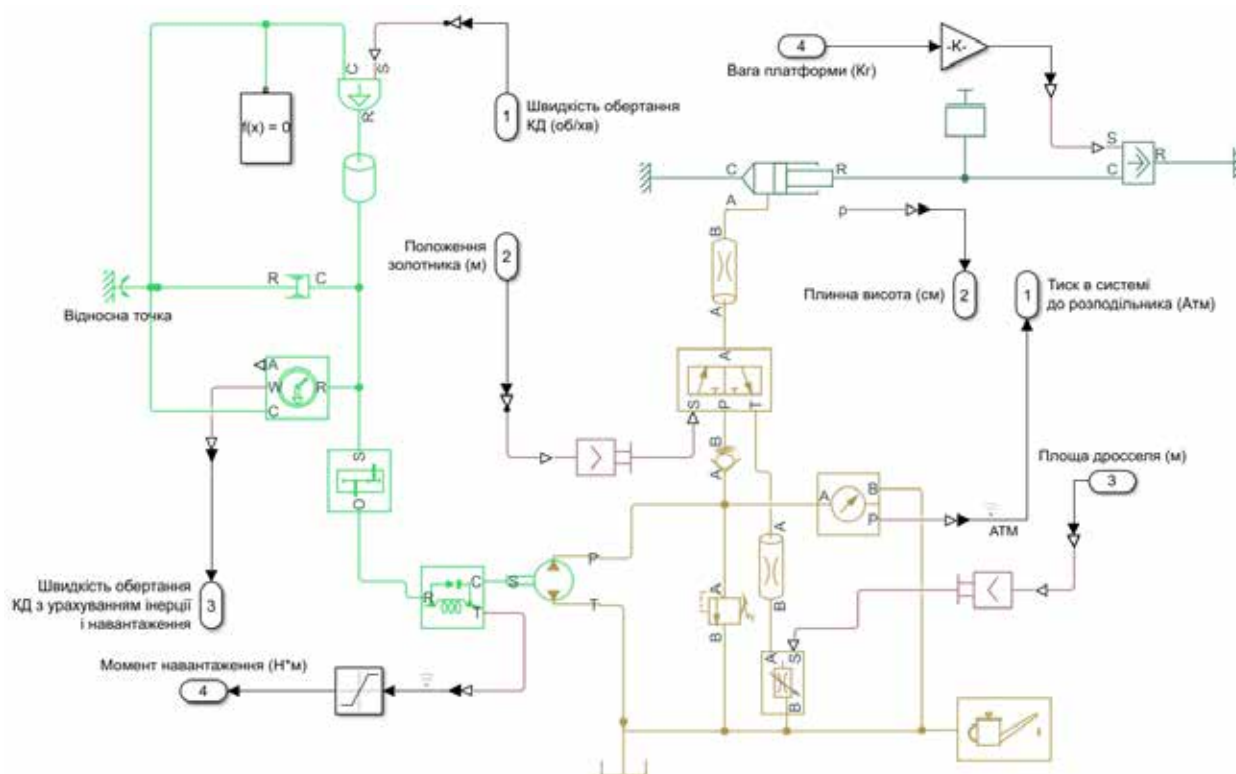


Рис. 6. Модель гідравлічної системи підйому платформи

швидкості та обертального моменту в моделі організовуються зв'язки та впливи, які необхідні для відтворення функціонування системи керування електроприводом. В свою чергу, при моделюванні процесів підйому платформи, враховується навантаження, що діє з боку гідравлічної частини у вигляді моментів опору, які треба подолати, щоб створити зусилля для переміщення платформи.

Гідравлічна частина складається з наступних блоків: гідравлічного насоса; гідропроводу, який характеризується певним гідравлічним опором; перепускного клапану; 3х-позиційного розподільника; дроселю із змінною площею перерізу; давача тиску; джерела навантаження; резервуара з гідравлічною рідиною; зворотнього (запобіжного) клапану. Взаємодія механічної і гідравлічної частин відбувається в результаті обертання валу насоса, який створює тиск в гідросистемі. Розподілення потоків здійснюється з допомогою 3х-позиційного розподільника.

Специфікою функціонування діючого механізму підйому платформи принтера є обертання насоса тільки в одному напрямку, що створює тиск в гідравлічному потоку від резервуару до гідроциліндрів. Перевищення значення цього тиску над тиском у штоковій порожнині, який залежить від ваги платформи, дає змогу переміщувати телескопічні циліндри тільки вгору,

тобто таким чином ми можемо тільки збільшувати висоту підйому платформи. Зменшення висоти підйому платформи здійснюється за рахунок зменшення тиску робочої рідини, яка зворотнім потоком, у разі необхідності, спрямовується від гідроприводу до резервуару збору робочої рідини. Перенаправлення потоків між насосом та гідроциліндром здійснюється з допомогою згаданого 3х-позиційного гідророзподільника. Для запобігання попадання робочої рідини від гідроциліндру до насоса під час переключення розподільника, а також після зупинки платформи на необхідній висоті, в трубопроводі після насоса встановлюється зворотній клапан, який пропускає потік тільки в одному напрямку. Регулювання швидкості опускання платформи здійснюється з допомогою електромагнітного клапану, який дає змогу встановлювати необхідний тиск та зусилля переміщення шляхом відстежування витрат потоку робочої рідини. Значення витрат потоку робочої рідини у зливній магістралі буде залежати від режимів комутації електромагнітного клапану, які проходять відповідно до параметрів сигналів, що надходять від пристрою керування. Встановлення необхідного положення золотника гідророзподільника здійснюється керуванням величиною струму в обмотках соленоїда, енергія якого переміщує золотник.

Головною характеристикою контуру керування підйомом платформи будівельного 3D-принтера є динаміка відпрацювання заданих значень висоти підйому платформи. Випробування моделі здійснювалося шляхом зміни уставок заданої висоти. В моделі використані параметри крокового двигуна 86BYG250D. Задані вихідні дані: швидкість для КД, маса вантажу (100 кг), висота підйому (0,1 м). Динаміка відпрацювання заданого значення висоти підйому реєструвалась осцилографами, які представлені на рис. 7 та рис. 8.

Із осцилограм зміни заданої H_z та плинної висоти H_i видно, що окрім затягування у часі, процес переміщення супроводжується коливаннями тиску. В момент початку обертання валу насоса, тиск в системі різко зростає, оскільки для зрушення штоку гідроциліндра

необхідно подолати момент опору від навантаження.

Отримані результати моделювання дають змогу сформулювати вимоги до типів і параметрів регуляторів, які необхідні для зменшення інтенсивності коливань параметрів механізму підйому платформи та точності її позиціонування.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Основним результатом досліджень є підвищення точності позиціонування висоти платформи стріли будівельного 3D-принтера завдяки опрацюванню режимів роботи крокового двигуна у складі електроприводу гідравлічної системи підйому. Розроблена модель каналу керування позиціонуванням стріли будівельного 3D-принтера, досліджені алгоритми керування кроковим двигуном по зміні витрат



Рис. 7. Осцилограми зміни параметрів висоти та тиску в системі

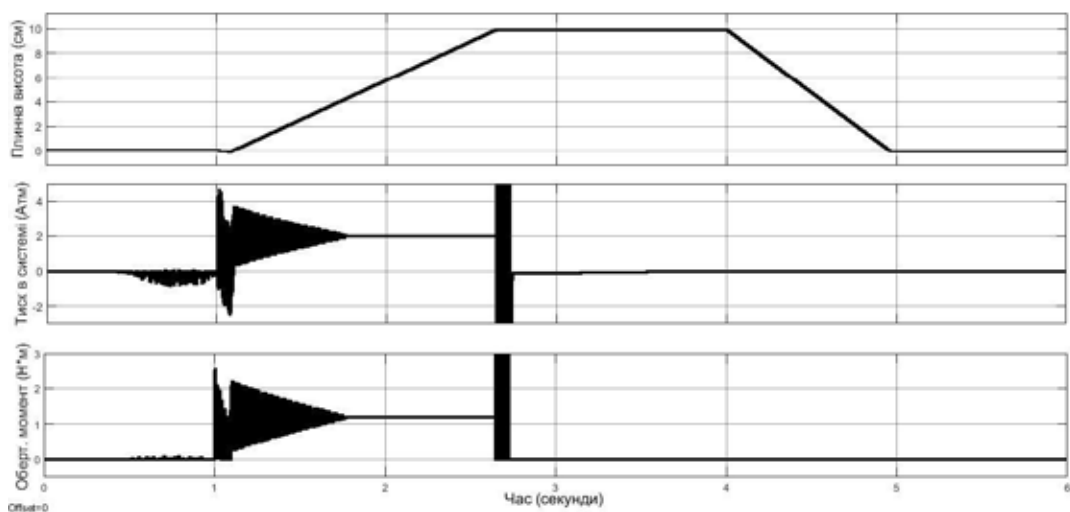


Рис. 8. Осцилограми зміни тиску і обертового моменту

робочого середовища, продуктивність і точність під час позиціонування платформи стріли. Модель дозволяє впровадити запропоновані методи моделювання для інших контурів керу-

вання об'єктом. Дані, отримані в ході моделювання, використані при розробці програмного забезпечення будівельного 3D-принтера радіального типу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Edenhofer S., Radler S., Hoss M., Von Mammen S. Self-organised construction with Revit. *IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self-Systems. FAS-W 2016*. 2016. P. 160–161. DOI: 10.1109/FAS-W.2016.44.
2. Labonnote N., Ronnquist A., Manum B., Ruther P. Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*. 2016. Vol. 72. P. 347–366. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
3. Кулинченко Г.В., Багута В.А., Коробов А.Г. Оценка характеристик мехатронного модуля на базе шагового двигателя. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2013. № 51 (1024). С. 43–53.
4. Жданов А.В. Математическая модель распределителя позиционного гидропривода строительных дорожных машин. *Омский научный вестник*. 2016. № 4 (148). С. 41–44.
5. Лекомцев П.В., Никитин Ю.Р., Трефилов С.А. Моделирование гибридного шагового двигателя в пространстве состояний при переменном моменте сопротивления нагрузки. *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18, № 3. С. 58–63. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63.
6. Репінський С.В., Козлов Л.Г., Паславська О.В., Мошноріз М.М., Бартецький А.А. Математична модель мехатронного гідроприводу маніпулятора з частотним керуванням асинхронного електродвигуна. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2019. Т. 9, № 1. С. 107–114. DOI: 10.31649/2413-4503-2019-9-1-107-114.
7. Дусанюк Ж.П., Петров О.В., Дерібо О.В., Черниш А.В. Математична модель та алгоритм дослідження динаміки гідроприводу ковша неповноповоротного екскаватора з урахуванням хвильових процесів в напірній гідролінії. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 3. С. 121–128. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2015_3_21.

REFERENCES:

1. Edenhofer, S., Radler, S., Hoss, M., Von Mammen, S. (2016). Self-organised construction with Revit. *IEEE 1st International Workshops on Foundations and Applications of Self-Systems. FAS-W 2016*, 160–161. DOI: 10.1109/FAS-W.2016.44.
2. Labonnote, N., Ronnquist, A., Manum, B., Ruther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.08.026.
3. Kulichenko, H.V., Bahuta, V.A., Korobov, A.H. (2013). Otchenka kharakteristik mekhatronnogo modul'ia na baze shagovogo dvigatel'ia [Evaluation of the characteristics of a mechatronic module based on a stepper motor]. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of the NTU «KhPI»*, 51, 43–53 [in Russian].
4. Zhdanov, A.V. (2016). Matematicheskaya model raspredelitel'ia pozitsionnogo gidroprivoda stroitel'no-dorozhnykh mashin [Mathematical model of the distributor of the positional hydraulic drive of road-building machines]. *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk Scientific Bulletin*, 4 (148), 41–44 [in Russian].
5. Lekomtsev, P.V., Nikitin, Yu.R., Trefilov, S.A. (2020). Modelirovanie gibridnogo shagovogo dvigatel'ia v prostranstve sostoianii pri peremennom momente soprotivleniia nagruzki [Simulation of hybrid step motor by state space at variable torque of load]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve – Intelligent systems in production*, 18 (3), 58–63 [in Russian]. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63.
6. Repinskyi, S.V., Kozlov, L.H., Paslavskaya, O.V., Moshnoriz, M.M., Bartetskyi, A.A. (2019). Matematychna model mekhatronnoho hidropyvodu manipuliatora z chastotnym keruvanniam asynkhronnoho elektrodvyhuna [Mathematical model of a mechatronic hydraulic actuator of a manipulator with frequency control of an asynchronous electric motor]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Journal of Mechanical Engineering and Transport*, 9 (1), 107–114 [in Ukrainian]. DOI: 10.31649/2413-4503-2019-9-1-107-114.
7. Dusaniuk, Zh.P., Petrov, O.V., Deribo, O.V., Chernysh, A.V. (2015). Matematychna model ta alhorytm doslidzhennia dynamiky hidropyvodu kovsha nepovnopovorotnoho ekskavatora z urakhuvanniam khvylovykh protsesiv v napirnyi hidrolinii [Mathematical model and algorithm for studying dynamics of the hydraulic drive of part-turn excavator bucket taking into account wave processes in the pressure hydraulic line]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 2015, 3, 121–128 [in Ukrainian]. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2015_3_21.

УДК 004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-6>

Антон МАЛЬЦЕВ

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математичних методів системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, Київ, Україна, 02000, ayumaltsev@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7861-6460

Бібліографічний опис статті: Мальцев, А. (2022). Методи машинного навчання нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних за допомогою сучасних мов програмування. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 39–43, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-6>

МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПЕРЕДБАЧЕННЯ ВЕЛИКИХ ЗАШУМЛЕНИХ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ МОВ ПРОГРАМУВАННЯ

У статті описано методи машинного навчання нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних за допомогою сучасних мов програмування. Описано особливості побудови штучної нейронної мережі, її сутність та структуру. Підкреслено, що реалізація методу машинного навчання нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних за допомогою сучасних мов програмування здійснюється у два основних етапи: перший етап являє собою попередню обробку даних, які є зашумленими та складають початковий набір направлений на структурування та здійснення обробки з метою отримання ефективного результуючого набору придатного для подальшого застосування, другий етап являє собою механізм виділення меж з отриманого результуючого набору. Локальний та адаптивний підхід направлено на реалізацію описаного першого етапу, наголошено, щодо ефективності такого підходу та виділено основні показники впливу на набір початкових даних. Результуючим фактором є можливість окремого незалежного впливу на кожен піксель зображення враховуючи початкові характеристики. Математично сформовано структуру штучної нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних, описано кожен окремий компонент, що входить у загальну структуру. Зазначається, що апроксимуюча функція базується на вхідних шарах у кількості три одиниці, та одного виходу. Підкреслено, що за умови кольоровості початкового набору даних, першочерговим є встановлення напівтону, з поступовим переходом у штучну нейронну мережу для подальшої обробки, при виході з нейронної мережі інформація про колір відновлюється. Описано підхід до оцінки якості зашумлених даних під час передбачення штучною нейронною мережею, наголошено, що мінімізація значення оцінки відповідає поліпшенню візуальної якості зображення, що розглядається. Схематично представлено архітектуру нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних: визначено вхідну структуру матриці та описано крайову матрицю виходу. Зазначається, що використання сучасних мов програмування дає можливість виконувати створення, навчання, моделювання, а також імпорт та експорт нейронних мереж та даних, використовуючи лише інструментальні можливості інтерфейсу.

Ключові слова: зашумлені дані, нейронна мережа, машинне навчання, мова програмування, трансформація, скінчені значення, великі дані.

Anton MALTSEV

PhD, Associate Professor at the Department of Mathematical Methods of System Analysis (MMSA), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy Avenue 37, Kyiv, Ukraine, 02000, ayumaltsev@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7861-6460

To cite this article: Maltsev, A. (2022). Metody mashynnoho navchannia neironnoi merezhi dla peredbachennia velykykh zashumlenykh danykh za dopomohoiu suchasnykh mov prohramuvannia [Methods of machine learning of the neural network to predict large noisy data using modern programming languages]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 39–43, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-6>

METHODS OF MACHINE LEARNING OF THE NEURAL NETWORK TO PREDICT LARGE NOISY DATA USING MODERN PROGRAMMING LANGUAGES

The article describes the methods of machine learning of the neural network to predict large noisy data using modern programming languages. Features of construction of an artificial neural network, its essence and structure are described. It is emphasized that the implementation of the method of machine learning neural network to predict large noisy data using modern programming languages is carried out in two main stages: the first stage is the pre-processing of data that is noisy the resulting set suitable for further use, the second stage is a mechanism for separating the boundaries of the resulting result set. The local and adaptive approach is aimed at the implementation of the described first stage, the effectiveness of such an approach is emphasized and the main indicators of the impact on the initial data set are highlighted. The resulting factor is the possibility of a separate independent effect on each peak of the image, taking into account the initial characteristics. Mathematically formed the structure of an artificial neural network to predict large noisy data, describes each individual component that is part of the overall structure. It is noted that the approximation function is based on the input layers in the amount of three units and one output. It is emphasized that given the color of the initial data set, the priority is to establish a halftone, with a gradual transition to an artificial neural network for further processing, when leaving the neural network, color information is restored. The approach to the assessment of the quality of noisy data during prediction by an artificial neural network is described, it is emphasized that the minimization of the assessment value corresponds to the improvement of the visual quality of the image under consideration. The architecture of the neural network for predicting large noisy data is schematically presented: the input structure of the matrix is determined and the boundary matrix of the output is described. It is noted that the use of modern programming languages allows the creation, training, modeling, as well as import and export of neural networks and data, using only the tools of the interface.

Key words: noisy data, neural network, machine learning, programming language, transformation, finite values, big data.

Актуальність проблеми. Великі дані та нейронні мережі стають однією з рушійних сил інновацій, соціального просування та розвитку життя. Можна чітко продемонструвати, як нейронні та великі мережі даних ідеально поєднуються та підкріплюються шляхом огляду основних концепцій та ключових технологій у масштабному сенсі, а також індукції дослідницької основи нейронної мережі.

В аспекті дослідження нейронної мережі структура потребує додаткових досліджень і розробок; у мережевій шкалі відсутні теоретичні вказівки; і алгоритм навчання має певну проблему. У аспекті великих зашумлених даних також існують три фундаментальні наукові проблеми, які гарантують узгодженість у високорозмірному розсіяному просторі; необхідність реалізувати місце для зберігання; а також представляти тимчасову кореляцію та реалізовувати прогноз великих даних. У цій галузі терміново потрібні додаткові дослідження, включаючи теоретичні та практичні аспекти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах сучасного розвитку, актуальності набувають роботи направлені на розвиток машинного навчання та штучного інтелекту.

Так Тимошук (2020) розробив спрощену модель паралельної сортувальної нейронної мережі дискретного часу.

Сторчак, Тушич та Бондарчук (2018) запропонували методику побудови інтелектуальної системи аналізу даних на основі нейронних мереж. Автори дослідили поняття зашумлених

даних та описано методи їх ефективною попередньої обробки.

Пронін та Мірошниченко (2021) запропонували інструменти для створення систем машинного навчання й аналізу даних. У статті Трочук (2021) розглянуто завдання інтерпретації результатів аудитів з прикладу технічних аудитів сайтів.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Rusiecki et. al. (2014), Ribli et. al. (2019), Lee et. al. (2004), Srivastava et. al. (2020), Deshpande et. al. (2020), Xie et. al. (2021), Li et. al. (2021), Burger and Engl (2000), Deshpande et. al. (2020), Yang et. al. (2021) та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання дослідження методів машинного навчання нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних за допомогою сучасних мов програмування залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

Визначення мети дослідження. Здійснити опис методів машинного навчання нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних за допомогою сучасних мов програмування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Наука про нейрони, подібні до нейронної системи людського тіла, в якій кожен нейрон з'єднаний з дендритами, які передають сигнали іншому нейрону у вигляді електричних імпульсів, являє собою нейронна мережа.

Функціонування штучної нейронної мережі, яка застосовується для передбачення великих зашумлених даних, оцінюється за послі-

довністю вихідних сигналів. Штучна нейронна мережа для передбачення великих зашумлених даних має вигляд:

$$P^*(x, y) = N(P(x, y), U(x, y), O(x, y))$$

де $P^*(x, y)$ і $P(x, y)$ – відповідно оброблене та вихідне значення яскравості пікселя (x, y) ; N – апроксимуюча функція; $O(x, y)$ – середнє значення дисперсії яскравості в локальній околиці пікселя, що обробляється; $U(x, y)$ – середнє значення яскравості в локальній околиці пікселя, що обробляється.

Відповідно до наведеного рівняння, апроксимуюча функція N базується на вхідних шарах у кількості три одиниці, та одного виходу. За умови кольоровості початкового набору даних, першочерговим є встановлення напівтону, з поступовим переходом у штучну нейронну мережу для подальшої обробки, при виході з нейронної мережі інформація про колір відновлюється.

Оцінка якості зашумлених даних під час передбачення штучною нейронною мережею здійснюється за допомогою наступної функції:

$$f_{\text{як.зашум.даних}} = \frac{LK - \eta}{LK} + \frac{256 - \exp(W)}{192} + \frac{255 - E/\eta}{255}$$

$$W = -\sum_{i=1}^{256} p_i \log p_i$$

де E – сума всіх значень інтенсивності яскравості пікселів, що входять до складу початкового набору зображень;

η – загальна кількість пікселів на контурах початкового зображення;

LK – ширина та висота початкового зображення направлено на обробку;

p_i – коефіцієнт пікселів зображення рівень яскравості яких коливається у межах значення з i .

Мінімізація значення $f_{\text{як.зашум.даних}}$ відповідає поліпшенню візуальної якості зображення, що розглядається.

З метою максимізації швидкості здійснення попередньої обробки даних, які є зашумленими та складають початковий набір направлений на структурування та здійснення обробки з метою отримання ефективного результуючого набору придатного для подальшого застосування необхідно обрахувати локальні значення середнього значення дисперсії яскравості в локальній околиці пікселя, що обробляється $O(x, y)$ та середнього значення яскравості в локальній околиці пікселя, що обробляється $U(x, y)$:

$$O(x, y) = \frac{O(x)(y\lambda) + O(y)(xk) + P}{3}$$

$$U(x, y) = \frac{U(x)(y\lambda) + U(y)(xk)}{2}$$

де $O(x)(y\lambda) + O(y)(xk)$ – середня яскравість у стовпці $y\lambda$ і рядку xk відповідно;

$O(x)(y\lambda) \cdot O(y)(xk)$ – дисперсії яскравості в стовпці $y\lambda$ та рядку xk відповідно;

$$y\lambda \in [i_1, i_2], xk \in [j_1, j_2];$$

$O(y)(xk)$ – середня яскравість зображення.

Принцип нейромережевого виділення контурів на зображенні ґрунтується на вихідному зображенні, яке є матрицею значень яскравості розміром $L_x \times L_y$. Висновком, отриманим під час попередньої обробки вхідної графічної інформації є контурна матриця також розміром $L_x \times L_y$. З метою структуризації місця розташування елементів, що входять до складу матриці використовуються дані отримані з першого етапу попередньої обробки даних.

Система рівнянь для визначення вектора ваг, має вигляд:

$$S \times w = V.$$

Встановлення розмірності вектора ваг w відбувається на основі отриманої матриці відповідно до кількості стовпців. У випадку отримання прямокутної матриці очевидно, що кількість рядків буде на порядок перевищувати кількість стовпців, така система має буди перевизначена на початку обробки даних. На основі вищевикладеного є можливість стверджувати, що завдання покладене на визначення вектора матриці реалізується у вигляді завдання мінімізації встановленої нев'язки у рамках евклідової норми.

Висновки і перспективи подальших досліджень. У роботі описано методи машинного навчання нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних за допомогою сучасних мов програмування. Застосування різних наборів зашумлених векторів дозволяє навчити мережу працювати із зашумленими даними. Використання сучасних мов програмування дає можливість виконувати створення, навчання, моделювання, а також імпорт та експорт нейронних мереж та даних, використовуючи лише інструментальні можливості інтерфейсу.

Перспективами подальшої роботи є розробка програмного застосунку для реалізації нейронної мережі для передбачення великих зашумлених даних за допомогою однієї з сучасних мов програмування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Тимошук П. В. Спрощена модель нейронної мережі дискретного часу для паралельного сортування. *Комп'ютерні системи та мережі*. 2020. Т. 2. № 1. С. 94–101.
2. Сторчак К. П., Тушич А. М., Бондарчук А. П. Кластерний аналіз даних із використанням штучних нейронних мереж. *Зв'язок*. 2018. № 6 (136). С. 36–38.
3. Пронін С. В., Мірошніченко М. О. Система для аналізу великих масивів даних за допомогою алгоритмів машинного навчання. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків, 2021. Вип. 94. С. 142–148.
4. Трочун Є. В. Спосіб інтерпретації результатів аудитів. *Науковий огляд*. 2021. № 4 (76). С. 36–45.
5. Training Neural Networks on Noisy Data / A. Rusiecki et al. *Artificial Intelligence and Soft Computing*. Cham, 2014. P. 131–142. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07173-2_13 (date of access: 16.04.2022).
6. Weak lensing cosmology with convolutional neural networks on noisy data / D. Ribli et al. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 490, no. 2. P. 1843–1860. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2610> (date of access: 16.04.2022).
7. A Hybrid Neural Network Model for Noisy Data Regression / E. W. M. Lee et al. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. 2004. Vol. 34, no. 2. P. 951–960. URL: <https://doi.org/10.1109/tsmcb.2003.818440> (date of access: 17.04.2022).
8. Learning Partial Differential Equations from Noisy Data using Neural Networks / K. Srivastava et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1655. P. 012075. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012075> (date of access: 17.04.2022).
9. On Neural Network Training from Noisy Data using a Novel Filtering Framework / V. Deshpande et al. *AIAA Scitech 2020 Forum*, Orlando, FL. Reston, Virginia, 2020. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2020-1869> (date of access: 17.04.2022).
10. Xie, Xuping & Bao, Feng & Maier, Thomas & Webster, Clayton. (2021). Analytic continuation of noisy data using Adams Bashforth residual neural network. *Discrete & Continuous Dynamical Systems – S*. 10.3934/dcdss.2021088.
11. Calibrating multi-dimensional complex ODE from noisy data via deep neural networks / Li Kexuan, et al. arXiv preprint arXiv:2106.03591 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/352208410_Calibrating_multi-dimensional_complex_ODE_from_noisy_data_via_deep_neural_networks (date of access: 17.04.2022).
12. Burger M., Heinz W. Engl. Training neural networks with noisy data as an ill-posed problem. *Advances in Computational Mathematics*. 2000. Vol. 13.4. P. 335–354.
13. Correction: On Neural Network Training from Noisy Data using a Novel Filtering Framework / V. Deshpande et al. *AIAA Scitech 2020 Forum*, Orlando, FL. Reston, Virginia, 2020. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2020-1869.c1> (date of access: 17.04.2022).
14. Neural Networks with Fixed Binary Random Projections Improve Accuracy in Classifying Noisy Data / Z. Yang et al. *Bildverarbeitung für die Medizin* 2021. Wiesbaden, 2021. P. 211–216. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-33198-6_51 (date of access: 17.04.2022).

REFERENCES:

1. Tymoshchuk, P. V. (2020). Sproshchena model neironnoi merezhi dyskretnoho chasu dlia paralelnoho sortuvannia [Simplified model of discrete time neural network for parallel sorting]. *Kompiuterni systemy ta merezhi*, 2(1), 94–101 [in Ukrainian].
2. Storchak, K. P., Tushych, A. M., Bondarchuk, A. P. (2018). Klasternyi analiz danykh iz vykorystanniam shtuchnykh neironnykh merezhi [Cluster analysis of data using artificial neural networks]. *Zviyazok*, 6 (136), 36–38 [in Ukrainian].
3. Pronin, S. V. & Miroshnychenko, M. O. (2021). Systema dlia analizu velykykh masyviv danykh za dopomohoiu alhorytmiv mashynnoho navchannia [A system for analyzing large data sets using machine learning algorithms]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 94, 142–148 [in Ukrainian].
4. Trochun, Ye. V. (2021). Sposib interpretatsii rezultatuv audytiv [Method of interpreting audit results]. *Naukovyi ohliad*, 4 (76), 36–45 [in Ukrainian].
5. Rusiecki, A., Kordos, M., Kamiński, T., & Greń, K. (2014). Training Neural Networks on Noisy Data. In *Artificial Intelligence and Soft Computing* (pp. 131–142). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07173-2_13
6. Ribli, D., Pataki, B. Á., Zorrilla Matilla, J. M., Hsu, D., Haiman, Z., & Csabai, I. (2019). Weak lensing

cosmology with convolutional neural networks on noisy data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490(2), 1843–1860. <https://doi.org/10.1093/mnras/stz2610>

7. Lee, E. W. M., Lim, C. P., Yuen, R. K. K., & Lo, S. M. (2004). A Hybrid Neural Network Model for Noisy Data Regression. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 34(2), 951–960. <https://doi.org/10.1109/tsmcb.2003.818440>

8. Srivastava, K., Ahlawat, M., Singh, J., & Kumar, V. (2020). Learning Partial Differential Equations from Noisy Data using Neural Networks. *Journal of Physics: Conference Series*, 1655, 012075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012075>

9. Deshpande, V., Das, N., Tadiparthi, V., & Bhattacharya, R. (2020). On Neural Network Training from Noisy Data using a Novel Filtering Framework. In *AIAA Scitech 2020 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2020-1869>

10. Xie, X., Bao, F., Maier, T., & Webster, C. (2021). Analytic continuation of noisy data using Adams Bashforth residual neural network. *Discrete & Continuous Dynamical Systems – S*, 0. <https://doi.org/10.3934/dcdss.2021088>

11. Li, K., Wang, F., Liu, R., Yang, F., & Shang, Z. (2021). Calibrating multi-dimensional complex ODE from noisy data via deep neural networks. *arXiv preprint arXiv:2106.03591*. URL: https://www.researchgate.net/publication/352208410_Calibrating_multi-dimensional_complex_ODE_from_noisy_data_via_deep_neural_networks (date of access: 17.04.2022).

12. Burger, M., & Engl, H. W. (2000). Training neural networks with noisy data as an ill-posed problem. *Advances in Computational Mathematics*, 13(4), 335–354.

13. Deshpande, V., Das, N., Tadiparthi, V., & Bhattacharya, R. (2020). Correction: On Neural Network Training from Noisy Data using a Novel Filtering Framework. In *AIAA Scitech 2020 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2020-1869.c1>

14. Yang, Z., Schilling, A., Maier, A., & Krauss, P. (2021). Neural Networks with Fixed Binary Random Projections Improve Accuracy in Classifying Noisy Data. In *Bildverarbeitung für die Medizin 2021* (pp. 211–216). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-33198-6_51

УДК 004.4

DOI <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-7>

Андрій МОРОЗОВ

кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, Житомир, Україна, 10005, morozov@ztu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-3167-0683

Scopus Author ID: 55912634100

Тетяна ВАКАЛЮК

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, Житомир, Україна, 10005, tetianavakaliuk@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6825-4697

Scopus Author ID: 57211133927

Юрій КУБРАК

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, Житомир, Україна, 10005, kubrak79@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1122-7580

Scopus Author ID: 57215318599

Денис ЗОСІМОВИЧ

здобувач, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, Житомир, Україна, 10005, unsinedz@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1533-3882

Бібліографічний опис статті: Морозов, А., Вакалюк, Т., Кубрак, Ю., Зосімович, Д. (2022). Аналіз факторів впливу на архітектури програмних систем. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 44–52, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-7>

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

У статті авторами досліджено існуючі підходи та рекомендації для побудови архітектур програмного забезпечення. Створення нового програмного продукту це завжди ризик. Обрання правильної архітектури є суттєвим кроком до успіху. Проаналізовано процес розробки, побудови та змін в архітектурі існуючого програмного комплексу. Виявлено зовнішні чинники, які впливали на процес розробки. Ними виявилися наступні: постійні зміни функціональних і нефункціональних вимог до розроблюваної системи; архітектурні тренди, які існували на момент проектування первинної архітектури; зміни фінансових умов розгортання та подальшої підтримки; зміна суб'єкта відповідальності за подальшу розробку системи. Було проведено аналіз деяких існуючих на сьогоднішній день досліджень у сфері програмних архітектур. З цього можемо зробити висновок про те, що дана сфера є досить широкою, а також є актуальним предметом для проведення наукових досліджень. Деякі дослідження вивчають економічні аспекти та корпоративні архітектури, причини архітектурних змін на пізніх фазах розробки або способи оцінки їх впливу на систему архітектуру. Кожен раз протягом усього процесу розробки програмного забезпечення існує низка факторів, які впливають на неї і, зокрема, призводять до прийняття певних архітектурних рішень. Розділимо умовно дані чинники на дві категорії: внутрішні та зовнішні. Провівши аналіз специфіки реалізації архітектур на основі конкретного прикладу довготривалої розробки, визначимо, що конкретна реалізація кожного з виду архітектур є досить масштабним та кропітким процесом, який вимагає ретельного планування та попереднього аналізу. Архітектурні помилки та фактори, що не були взяті до уваги або були недооцінені, можуть призвести до нівелювання попереднього прогресу або значної переробки існуючої системи. Це призводить до значного збільшення загальної вартості розроблюваної системи.

Ключові слова: фактори впливу, програмні системи, архітектура.

Andrii MOROZOV

PhD in Engineering, Associate Professor, Vice Rector in Scientific and Pedagogical Work, Zhytomyr Polytechnic State University, 103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine, morozov@ztu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-3167-0683

Scopus Author ID: 55912634100

Tetiana VAKALIUK

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor at the Department of Software Engineering, Zhytomyr Polytechnic State University, 103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine, tetianavakaliuk@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6825-4697

Scopus Author ID: 57211133927

Yurii KUBRAK

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Software Engineering, Zhytomyr Polytechnic State University, 103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine, kubrak79@ukr.net

ORCID: 0000-0002-1122-7580

Scopus Author ID: 57215318599

Denys ZOSIMOVYCH

Zhytomyr Polytechnic State University, 103, Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine, unsinedz@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1533-3882

To cite this article: Morozov, A., Vakaliuk, T., Kubrak, Yu., Zosimovych, D. (2022). Analysis of factors influencing the architecture of software systems. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 1, 44–52, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-7>

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE ARCHITECTURE OF SOFTWARE SYSTEMS

In the article, the authors explored existing approaches and recommendations for building software architectures. Creating a new software product is always a risk. Choosing the right architecture is an essential step to success. The process of development, construction, and changes in the architecture of the existing software package is analyzed. Identified external factors influencing the development process. They turned out to be the following: constant changes in the functional and non-functional requirements for the system being developed; architectural trends that existed at the time of designing the primary architecture; changes in financial conditions for deployment and further support; changing the subject of responsibility for the further development of the system. An analysis was made of some of the current research in the field of software architectures. From this, we can conclude that this area is quite wide, and is also a topical subject for scientific research. Some studies examine economics and enterprise architectures, the reasons for architectural changes in late phases of development, or how to evaluate their impact on system architecture. Each time throughout the entire software development process, some factors influence it and, in particular, lead to the adoption of certain architectural decisions. We conditionally divide these reasons into two categories: internal and external. After analyzing the specifics of the implementation of architectures based on a specific example of long-term development, we determine that the specific implementation of each type of architecture is a fairly large-scale and painstaking process that requires careful planning and preliminary analysis. Architectural errors and factors that were not taken into account or underestimated can lead to the leveling of previous progress or significant reworking of the existing system. This leads to a significant increase in the total cost of the system being developed.

Key words: action factors, software systems, architecture.

Актуальність проблеми. Створення нового програмного продукту це завжди ризик. Обрання правильної архітектури є суттєвим кроком до успіху (System Architecture). Найбільш розповсюдженими на сьогоднішній день є наступні архітектури: мікро-сервісна архітектура (МСА); сервісно-орієнтована архітектура (COA); безсерверна архітектура (БА); монолітна архітектура (МА).

Кожен раз протягом усього процесу розробки програмного забезпечення існує низка факторів, які впливають на неї і, зокрема, призводять до прийняття певних архітектурних рішень. Розділимо умовно дані чинники на дві категорії: внутрішні та зовнішні.

Під внутрішніми факторами впливу ми вважаємо ті, що виникли у команди під час процесу розробки. Прикладом таких можуть слугувати наступні:

- рівень професіоналізму окремих її членів, від якого залежить широта аналізу контексту проблем протягом їх вирішення;
- домовленості всередині команди, тобто набір існуючих або власних практик щодо розробки ПЗ;
- емоційний стан або інші персональні аспекти, що так чи інакше впливають на якість реалізованого розробником функціоналу.

Зовнішніми факторами будемо вважати ті, чия природа виникнення знаходиться поза межами команди розробки. Прикладом можуть слугувати наступні: процеси, впроваджені менеджментом для вирішення типових задач розробки програмного забезпечення; фінансова ситуація компанії; соціально-економічні фактори, що можуть впливати на компанію або напяму на команду розробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасне ІТ – це перш за все про бізнес. Саме він зацікавлений, як ніхто інший, в мінімізації витрат на розробку програмних продуктів. Це спричинює попит на персонал, кваліфікований для проектування архітектур корпоративних систем. Дуже часто ці люди діляться власним досвідом на конференціях, у статтях, а також проводять дослідження архітектур.

У своїй праці «Архітектура програмних систем» Оуен Вудс (англ. Eoin Woods) разом з Ніком Розанські досліджували шляхи моделювання архітектур, які відображають та тримають в балансі потреби стейкхолдерів програмних продуктів. Були розглянуті наступні проблеми (Nick Rozanski, Eóin Woods, 2011):

- істотні моменти моделювання систем з точки зору архітектури;
- наслідки ігнорування аспектів швидкодії, гнучкості та розміщення;
- сценарії та шляхи створення та перевірки архітектур;
- підходи до поєднання гнучких методологій розробки та корпоративних архітектур.

Спираючись на зазначене дослідження, Оуен Вудс описав поширені архітектурні помилки та рекомендації щодо їх уникнення, а саме (Eoin Woods, 2008):

- нефункціональні помилки є більш складними;
- частий фокус на більш локальні проблеми, приділяючи менше часу аналізу ширшого контексту;
- правильний системний дизайн дозволяє легко нашаровувати новий функціонал;
- оцінка важливості функціоналу шляхом виміру кількості прибутку з точки зору окупності інвестицій (ROI, return of investment);

– системи та їх архітектури будуються для стейкхолдерів;

- необхідно розділяти «позитивних» та «негативних» стейкхолдерів.

Виходячи з цього, можна зробити висновок про те, що дане дослідження проводилося на предметі корпоративних архітектур, тобто акцент було зроблено саме на аналізі економічних аспектів та бізнесу.

Розглянемо роботу Байрона Дж. Вільямса та Джефрі К. Карвера «Характеристика змін програмних архітектур». Дослідження стосувалося причин архітектурних змін, їх класифікації та обсягу їх впливу на компоненти системи. Також, було частково проаналізовано проблематику підтримки програмних продуктів, які мають застарілу або невідповідну вимогам архітектуру (Byron J. Williams, Jeffrey C. Carver, 2010).

Упор у дослідженні було зроблено саме на пізніх архітектурних змінах, тобто на тих, що відбуваються в останніх фазах розробки програмних систем. У результаті виявлено та охарактеризовано типи даних змін, а також було розроблено фреймворк для аналізу та кращого розуміння їх причин.

У науковій роботі Дзіянцзюна Дзяо та Хондзі Яня «Аналіз впливу змін для підтримки архітектурної еволюції» було запропоновано підхід до оцінки впливу архітектурних змін на систему. Для цього було представлено спосіб відокремлення та розділення архітектурних моделей. Однією з головних переваг даного підходу є оцінка характеру змін в архітектурі системи на основі аналізу її формальних архітектурних специфікацій, що дозволяє повністю автоматизувати даний процес (Jianjun Zhao, Hongji Yang, Baowen Xu, 2002).

Беручи до уваги предмет на результати зазначеного дослідження, можна визначити, що воно більше стосувалося технічних аспектів системних архітектур.

Було проведено аналіз деяких існуючих на сьогоднішній день досліджень у сфері програмних архітектур. З цього можемо зробити висновок про те, що дана сфера є досить широкою, а також є актуальним предметом для проведення наукових досліджень. Деякі дослідження вивчають економічні аспекти та корпоративні архітектури (Nick Rozanski, Eóin Woods, Eoin Woods), причини архітектурних змін на пізніх фазах розробки (Byron J. Williams, Jeffrey C. Carver, 2010) або способи оцінки їх впливу на системну архітектуру (Jianjun Zhao, Hongji Yang, Baowen Xu, 2002).

Мета дослідження. Здійснити аналіз факторів впливу на архітектури програмних систем.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розпочнемо аналіз реалізації деяких з них на прикладі системи розкладу для Державного університету «Житомирська політехніка», яка розроблювалася протягом 4 років (активна розробка припадає сумарно на 16-18 місяців).

Під час першої фази розробки вимоги до системи були досить простими, а саме: відображення актуального розкладу бази університету в мобільному додатку з мінімальними або відсутніми затратами на розміщення і підтримку інфраструктури. Для простоти розробки система мала монолітну архітектуру (MA). Схематично архітектуру зображено на рис. 1.

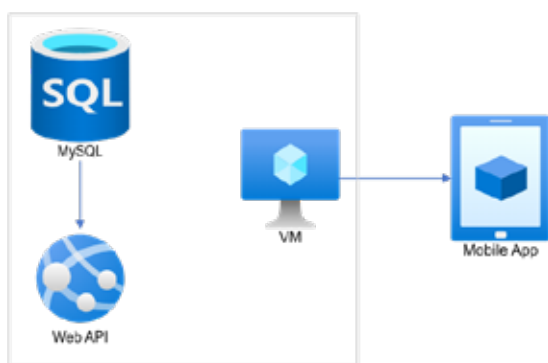


Рис. 1. Архітектурна схема моноліту

Монолітна архітектура – традиційна уніфікована модель побудови програмного забезпечення. В даному контексті монолітність означає скомпонованість функціоналу в єдиному місці, масивність, неможливість бути зміненим (Monolithic architecture definition).

На віртуальній машині (VM) було розміщено копію бази університету (MySQL) та серверний додаток (Web API). Мобільний додаток (Mobile App) виконує HTTP запити для отримання розкладу у форматі JSON та подальшого його відображення користувачеві. Мобільний додаток було опубліковано в режимі обмеженого тестування на платформі Google Play. Вихідний код системи наприкінці фази 1 наявний за посиланням (GitHub: ZSTU-App).

Для розробки системи було використано наступні технології: платформа Node.js та фреймворк Express; система управління базами даних MySQL; інфраструктура віртуальної машини – NginX, certbot; мобільний додаток – Flutter, SQLite.

З часом виникла необхідність розробки функціоналу для управління розкладом в базі. Вважатимемо її фазою 2. Вимоги до веб-додатка були наступні:

- наявність користувацького інтерфейсу панелі управління;
- зміни в інтерфейсі повинні виконувати зміни в базі даних;
- результатом змін має бути відображення оновленого розкладу на мобільному додатку.

На той момент необхідно було дати відповідь на фундаментальні запитання:

- чи продовжувати розробку в рамках моноліту?
- які технології використати для реалізації фази 2?
- як реалізувати COA в контексті моноліту з мінімальними затратами часу?

У результаті було розроблено окремий додаток з використанням технологій ASP.NET Core, HTML, CSS та JavaScript. Через брак досвіду з прийняття архітектурних рішень на той час останнє питання було зовсім не тривіальним. Виконувати міграцію системи з віртуальної машини у хмарне середовище Azure Cloud або Amazon Web Services було очевидно дорого, тим паче машина вже знаходилася в інфраструктурі хмарного стартапу Scaleway. Було прийнято рішення розмістити додаток панелі адміністрування на машині поряд з монолітом.

Отже, на момент виконання фази 2 архітектура додатку виглядала наступним чином (рис. 2).

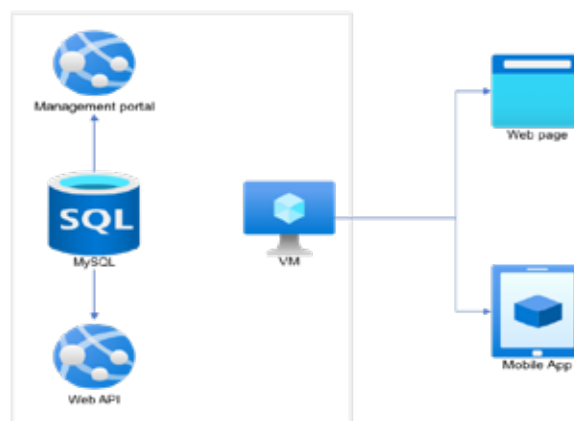


Рис. 2. Архітектурна схема системи (фаза 2)

COA визначає підходи для того, щоб зробити програмні компоненти багаторазовими у використанні та інтероперабельними шляхом впровадження сервісних інтерфейсів. Сервіси використовують спільні стандарти інтерфейсів та архітектурні шаблони так, що їх можна легко та швидко інтегрувати в нові додатки (What is SOA).

Додаток для управління розкладом та веб-сервіс для його отримання можна вважати від-

носно незалежними, адже вони не комунікують між собою через відсутність такої потреби. Також, кожен з додатків був частиною однієї системи, адже мав доступ до одного джерела інформації – бази даних MySQL. Обидва функціональні компоненти системи мали власні програмні інтерфейси. Отже, можна сказати, що система почала набувати ознак COA. Вихідний код додатку, що було створено у фазі 2, можна переглянути за посиланням (GitHub: ScheduleManager).

Однією з переваг COA є можливість масштабування окремих сервісів. Даний вид масштабування можна назвати горизонтальним в контексті системного рішення, адже масштабується лише деякий окремий її компонент, а не вся система в цілому. Умови використання додатку було проаналізовано на момент проектування фази 1. У результаті було виявлено, що система не потребує спеціальної реалізації можливостей горизонтального масштабування в майбутньому. Проте, у випадку крайньої необхідності архітектура могла виглядати наступним чином (рис. 3).

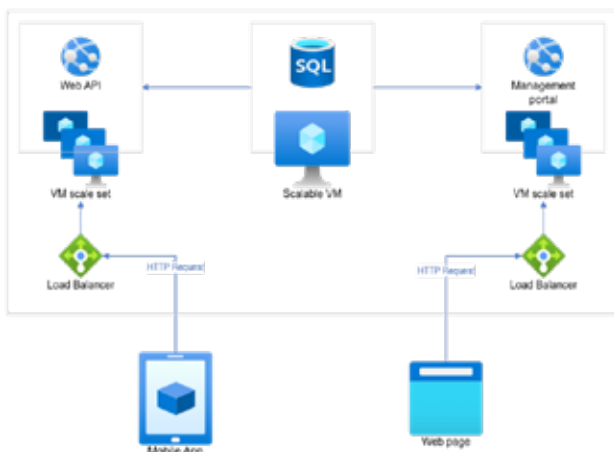


Рис. 3. Архітектура масштабованої системи

Для того, щоб оцінити обсяг потенційних робіт, розберемо архітектуру системи, яка надає можливість масштабування своїх компонентів.

На діаграмі (рис. 3) можна побачити появу нових сервісів, таких як розподільувач навантаження (load balancer), масштабований набір віртуальних машин (VM scale set) та окремо масштабована віртуальна машина (Scalable VM).

Розподільувач навантаження – сервіс, який відповідає за маршрутизацію вхідних запитів відповідно до навантаження кінцевих серверів. Використання даного компонента є необхідним

для архітектур, в яких окремі компоненти існують у вигляді множини однотипних одиниць.

Масштабований набір віртуальних машин є прикладом такої множини. За допомогою збільшення кількості ідентичних сервісів вирішується проблема обмеженості апаратних потужностей однієї машини. Тепер окремий компонент можна розміщувати декілька разів, доки існують ресурси інфраструктури. Таким чином створюється кластер. Даний підхід називають горизонтальним масштабуванням (Horizontal vs Vertical scaling).

Під масштабуванням окремої віртуальної машини мається на увазі збільшення її обчислювальних потужностей, таких як центральний процесор, оперативна пам'ять, пропускна властивість мережі, оптимізація операційної системи тощо. Даний підхід називають вертикальним масштабуванням (Horizontal vs Vertical scaling).

Для надання системі масштабованості необхідно було б використати низку нових сервісів, налагодити їх взаємодію. Кошти та зусилля на розгортання та підтримку даної інфраструктури також були б значними. Найчастіше такі заходи проводяться для високонавантажених та розподілених систем, замовниками яких є великі корпорації, що можуть собі дозволити витратити десятки тисяч доларів на утримання подібних рішень.

Через те, що замовником виступав університет, а кінцевою аудиторією виступали студенти, викладачі, адміністрація та абітурієнти, кількість яких не можна назвати великою в контексті програмних рішень, розроблювана система не мала ознак високонавантаженої. А отже, дії щодо розробки засад для подальшого її масштабування були б зайвими.

Через деякий час після завершення фази 2 в системі було виявлено декілька суттєвих проблем, основною з яких була проблема її подальшої підтримки та розробки. Через те, що система складається з декількох компонентів, необхідно слідкувати та дороблювати кожний. Ресурси для виконання таких дій є досить обмеженими, а отже постало питання доцільності і можливості використання подібного програмного рішення. За час розробки фази 1 та 2 тренд безсерверної архітектури набував не лише більшої популярності в IT світі, але й з'явилася велика кількість відгуків щодо досвіду її впровадження.

Безсерверна архітектура – це підхід до побудови та розгортання хмарних додатків та сервісів без необхідності підтримки інфраструктури. В таких додатках виконання коду, його

підтримка та постачання є обов'язком обраної хмарної системи. Безсерверна архітектура виключає необхідність управління ресурсами, масштабуванням додатку, підтримки серверу, бази даних та сховища з боку розробника (System Architecture).

Існує дві основних концепції безсерверних архітектур: функція як сервіс (FaaS) та серверне забезпечення як сервіс (BaaS) (System Architecture).

FaaS (Function as a Service) – модель хмарного обчислення, в якій розробник може завантажувати окремі одиниці функціоналу у хмару та дозволити їм виконуватися незалежно (System Architecture).

BaaS (Backend as a Service) – модель хмарного обчислення, яка дозволяє розробнику «віддати на аутсорс» серверні аспекти (управління базою даних, хмарним сховищем, хостинг, автентифікація користувачів тощо) та писати і підтримувати лише клієнтську частину системи (GitHub: ZSTU-App).

Проаналізувавши існуючий ринок безсерверних сервісів, а також переваги, які вони надають, було прийнято рішення мігрувати існуючу систему управління розкладом на безсерверну архітектуру. Розробку в рамках даної міграції вважатимемо фазою 3. Постачальником послуг було обрано Google Firebase. Серед переваг було враховано наступні:

- простота розгортання та налаштування програмного рішення;
- вартість розміщення безсерверної інфраструктури, безкоштовні плани;
- простота підтримки та моніторингу за системою;
- простота інтеграції мобільних сервісів;
- простота інтеграції з існуючим мобільним рішенням.

Однією з основних особливостей безсерверних сервісів є умови тарифікації. В контексті BaaS вони найчастіше працюють за принципом Pay-as-you-go (плати у міру використання). Google Firebase є NoSQL базою даних та надає квоти на читання, запис та видалення рядків, а також на загальне місце збереження даних у віртуальному сховищі.

Використання Google Firebase змусило вдатися до міграції існуючої MySQL бази даних (рис. 4). Під час першої спроби базу було мігровано зі збереженням існуючої третьої форми нормалізації (Database normalization basics). Загальний об'єм даних в колекціях Google Firebase складав близько 300 МБ, що задовольняло на той час безкоштовну квоту у 1 Гб.

Згодом під час первинної розробки та тестування виникла проблема – для перегляду розкладу одним користувачем додатку виконувалось одразу низка запитів на читання наступних сутностей: заняття, предмет, часовий проміжок заняття, викладач, аудиторія, підгрупа, група, факультет.

Маючи реальну базу розкладу, було виконано аналіз існуючих даних. Середня кількість занять для групи – 21; предметів для групи – 8 (наближено); унікальних аудиторій та викладачів майже стільки ж, скільки і пар, вважатимемо, що теж по 10; середня кількість підгруп для групи – 1,8; факультети та часові проміжки можна зберігати в кеші мобільного додатку, тобто не запитувати окремо. Маючи ці наближені дані, можна легко порахувати, що для 1 перегляду розкладу 1 групи виконуватиметься $21 + 8 + 10 + 10 + 1,8 = 50,8$ запитів на читання рядків.

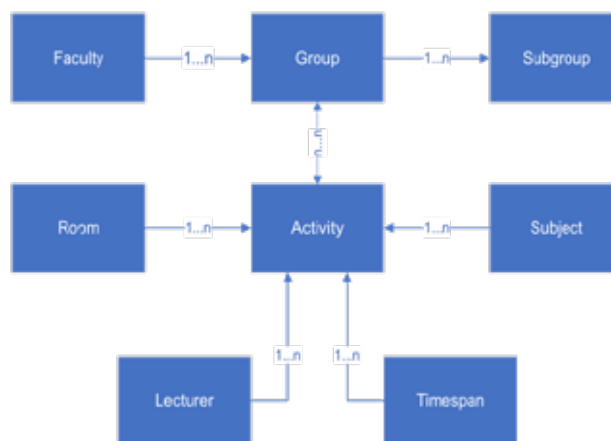


Рис. 4. Схема кількісних зв'язків сутностей існуючої бази

Беручи до уваги сценарій, коли студенти переглядають розклад перед кожною парою та щовечора, з'являється ще один множник переглядів на день, вважатимемо його 5. Якщо кожен 5 студент використовуватиме додаток, то маємо ще один наближений множник 800. В результаті – $50,8 * 5 * 800 \approx 200$ тис. запитів на читання рядка щодня, при безкоштовній квоті у 50 тис., що є недопустимим згідно з вимогами.

Повернемося до факту, що безкоштовна квота на віртуальне сховище була не використана майже на 70%. Наявність вільного місця дозволяє нам частково пожертвувати ним задля вирішення проблеми надмірної кількості запитів шляхом денормалізації бази даних способом шардованого розбиття даних.

Шардинг даних (англ. *data sharding*) – практика оптимізації систем управління базами

даних (СУБД) шляхом розділення рядків або колонок великих таблиць бази на декілька менших таблиці. В результаті отримані таблиці називаються шардами (або партиціями). Кожна з них або має однакову схему та унікальні набори рядків (горизонтальне шардування), або схему, атрибути якої є підмножиною оригінальної схеми (вертикальне шардування) (An overview of sharding and partitioning).

Упровадження зазначеного підходу к контексті нетабличної NoSQL бази Google Firebase мало власну інтерпретацію. Так, проаналізувавши варіанти використання (use-cases) додатку, єдиним типом, пов'язаним із зазначеною проблемою, було визначено пошук та перегляд розкладу для групи. Це дозволило дефініювати формат ключів партицій для множини занять – «сутність/ідентифікатор», наприклад «group/24».

Користуючись перевагами, які надають NoSQL рішення для збереження даних, а саме можливість збереження множини даних в рамках одного запису, кожна партиція мала всі необхідні дані для задоволення варіанту використання «пошук та перегляд розкладу за групою», а отже 1 перегляд розкладу для 1 групи виконував лише 1 запит на читання рядка, зменшуючи оцінювану очікувану кількість щоденних запитів в реальному середовищі до 4 тис. При цьому, розмір сховища виріс до 625 МБ, що

також попадало під безкоштовну квоту. Часткову умовну схему вихідної сутності, шарду, наведено у таблиці 1.

Для автоматизації процесу засобами Node.js та мовою JavaScript було розроблено скрипт, що виконував міграцію даних з вхідної бази MySQL у локальний образ бази Google Firestore. Вихідний образ завантажувався цілісно у хмарне середовище. Це дозволило легально «обійти» квоту на запис рядків до колекцій зазначеної вихідної бази в реальному середовищі. Вихідний код фази 3 можна знайти за посиланням [9].

Важливо зазначити, що проаналізована схема даних Google Firestore вважалася незмінною і використовувалася лише для читання, тобто при оновленні даних в існуючій MySQL базі необхідно було повторити процес міграції. Оновлення нової схеми вважаємо досить дорогою операцією через роздробленість даних та квоти на запис, що показує нам втрати в консистентності системи, а саме:

- складність операції запису через велику кількість партицій;
- відсутність єдиного «джерела правди»;
- зміни в одній партиції не впливають на інші;
- відсутність механізму транзакцій для виконання атомарних змін у декількох партиціях одночасно (обмеження використаної СУБД).

Таблиця 1

Часткова умовна схема шарду

timetable_items		
Поле	Тип	Опис
key	string	Ключ партиції
timetableId	string	Ідентифікатор пов'язаного запису налаштувань розкладу
items	timetable_group_item[]	Набір сутностей опису занять
timetable_group_item		
dayNumber	integer	День тижня
weekNumber	integer	Номер тижня
activity	Activity	Сутність заняття
Activity		
name	string	Назва предмету
room	string	Номер аудиторії
time	{start: string, end: string}	Проміжок часу
tutor	Tutor	Викладач
type	string	Лабораторна, лекція, практика
groups	Group[]	Присутні групи
Group		
id	integer	Ідентифікатор групи
facultyId	integer	Ідентифікатор факультету
year	string	Курс, освітній рівень
name	string	Назва групи
subgroups	Subgroup[]	Набір підгруп

Так емпіричним шляхом була перевірена CAP (англ.) теорема або теорема Брюера. Згідно з даною теоремою, розподілена система може мати лише 2 з 3 зазначених властивостей (What is the CAP theorem): консистентність (Consistency); доступність (Availability); толерантність до партицій (Partition tolerance).

У результаті фази 3 було проведено міграцію даних та написано автоматизований скрипт, який повністю забрав на себе функції веб-додатку, розробленого у фазі 1. Це призвело до того, що значну частину роботи фази 1 було втрачено через відсутність необхідності її подальшого використання. Також, наслідком зміни сховища даних маємо необхідність проведення змін у компонентах системи, що від нього залежать, а саме в мобільному додатку.

Отже, провівши аналіз специфіки реалізації архітектур на основі конкретного прикладу довготривалої розробки, визначимо, що конкретна реалізація кожного з виду архітектур є досить масштабним та кропітким процесом, який вимагає ретельного планування та попереднього аналізу. Архітектурні помилки та

фактори, що не були взяті до уваги або були недооцінені, можуть призвести до нівелювання попереднього прогресу або значної переробки існуючої системи. Це призводить до значного збільшення загальної вартості розроблюваної системи.

Висновки і перспективи подальших досліджень. В результаті авторами досліджено існуючі підходи та рекомендації для побудови архітектур програмного забезпечення. Проаналізовано процес розробки, побудови та змін в архітектурі існуючого програмного комплексу. Виявлено зовнішні чинники, які впливали на процес розробки. Ними виявилися наступні: постійні зміни функціональних і нефункціональних вимог до розроблюваної системи; архітектурні тренди, які існували на момент проектування первинної архітектури; зміни фінансових умов розгортання та подальшої підтримки; зміна суб'єкта відповідальності за подальшу розробку системи. До перспектив подальших досліджень відносимо вдосконалення архітектури додатку на прикладі розкладу Державного університету «Житомирська політехніка».

ЛІТЕРАТУРА:

1. System Architecture. URL: <https://rubygarage.org/blog/monolith-soa-microservices-serverless> (дата звернення: 01.11.2021).
2. Monolithic architecture definition. URL: <https://whatis.techtarget.com/definition/monolithic-architecture> (дата звернення 16.11.2021).
3. GitHub: ZSTU-App. URL: <https://github.com/unsinedz/ZSTU-App> (дата звернення: 05.11.2021).
4. What is SOA. URL: <https://www.ibm.com/cloud/learn/soa> (дата звернення: 05.11.2021).
5. GitHub: ScheduleManager. URL: <https://github.com/unsinedz/ScheduleManager> (дата звернення: 05.11.2021).
6. Horizontal vs Vertical scaling. URL: <https://touchstonesecurity.com/horizontal-vs-vertical-scaling-what-you-need-to-know> (дата звернення: 05.11.2021).
7. Database normalization basics. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/office/troubleshoot/access/database-normalization-description> (дата звернення: 14.11.2021).
8. An overview of sharding and partitioning. URL: <https://hazelcast.com/glossary/sharding> (дата звернення 14.11.2021).
9. GitHub: Zhytomyr-polytechnic. URL: <https://github.com/unsinedz/zhytomyr-polytechnic/tree/develop> (дата звернення: 14.11.2021).
10. What is the CAP theorem. URL: <https://www.ibm.com/cloud/learn/cap-theorem> (дата звернення: 05.11.2021).
11. Nick Rozanski, Eoin Woods. Software Systems Architecture: Working With Stakeholders Using Viewpoints and Perspectives. Addison-Wesley, 2011, 704 p. URL: <https://books.google.com/books?id=ka4QO9kXQFUC> (дата звернення: 19.11.2021).
12. Eoin Woods. Top 10 Architecture Mistakes, 2008. 42 p. URL: <http://jaoo.dk/dl/jaoo-aarhus-2008/slides/EoinWoodsTop10Mistakes.pdf> (дата звернення: 19.11.2021).
13. Byron J. Williams, Jeffrey C. Carver. Characterizing software architecture changes: a systematic review. *Information and Software Technology*. Volume 52, Issue 1, January 2010, Pages 31-51. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2009.07.002>
14. Jianjun Zhao, Hongji Yang, Baowen Xu. Change impact analysis to support architectural evolution. *Journal of Software Maintenance and Evolution Research and Practice*, Vol. 14(5), 2002. Pp. 317-333. DOI: 10.1002/smr.258

REFERENCES:

1. System Architecture. Retrieved from: <https://rubygarage.org/blog/monolith-soa-microservices-serverless>.
2. Monolithic architecture definition. Retrieved from: <https://whatistechtarget.com/definition/monolithic-architecture>.
3. GitHub: ZSTU-App. Retrieved from: <https://github.com/unsinedz/ZSTU-App>.
4. What is SOA. Retrieved from: <https://www.ibm.com/cloud/learn/soa>.
5. GitHub: ScheduleManager. Retrieved from: <https://github.com/unsinedz/ScheduleManager>.
6. Horizontal vs Vertical scaling. Retrieved from: <https://touchstonesecurity.com/horizontal-vs-vertical-scaling-what-you-need-to-know>.
7. Database normalization basics. Retrieved from: <https://docs.microsoft.com/en-us/office/troubleshoot/access/database-normalization-description>.
8. An overview of sharding and partitioning. Retrieved from: <https://hazelcast.com/glossary/sharding>.
9. GitHub: Zhytomyr-polytechnic. Retrieved from: <https://github.com/unsinedz/zhytomyr-polytechnic/tree/develop>.
10. What is the CAP theorem. Retrieved from: <https://www.ibm.com/cloud/learn/cap-theorem>.
11. Nick Rozanski, Eoin Woods. Software Systems Architecture: Working With Stakeholders Using Viewpoints and Perspectives. Addison-Wesley, 2011, 704 p. Retrieved from: <https://books.google.com/books?id=ka4QO9kXQFUC>.
12. Eoin Woods. Top 10 Architecture Mistakes, 2008. 42 p. Retrieved from: <http://jaoo.dk/dl/jaoo-aarhus-2008/slides/EoinWoodsTop10Mistakes.pdf>.
13. Byron J. Williams, Jeffrey C. Carver. Characterizing software architecture changes: a systematic review. *Information and Software Technology*. Volume 52, Issue 1, January 2010, Pages 31-51. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2009.07.002>
14. Jianjun Zhao, Hongji Yang, Liming Xiang, Baowen Xu. Change impact analysis to support architectural evolution. *Journal of Software Maintenance and Evolution Research and Practice*, Vol. 14(5), 2002. Pp. 317-333. DOI: 10.1002/smr.258

ЗМІСТ

Михайло БЕРДНИК, Ірина УДОВИК, Олексій АЛЕКСЄЄВ, Наталія КАРЕВІНА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЗАДАЧІ НЕЙМАНА ТЕПЛООБМІНУ ОБТІЧНИКІВ ДЛЯ РАКЕТ.....	3
Vyacheslav GOREV, Alexander GUSEV, Valerii KORNIIENKO ON THE ACCURACY OF SOME APPROXIMATIONS FOR THE KOLMOGOROV–WIENER FILTER WEIGHT FUNCTION FOR POWER–LAW STRUCTURE FUNCTION PROCESSES.....	9
Олег ЄМЕЦЬ, Оксана ЧЕРНЕНКО, Тетяна ПАРФЬОНОВА, Олена ОЛЬХОВСЬКА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ПРОДУКТИВНИХ СИЛ З ВРАХУВАННЯМ МІНІМАЛЬНОЇ ШКОДИ НАВКОЛИШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩУ.....	14
Валерій КОРНІЄНКО, Олександра ГЕРАСІНА, Дмитро ТИМОФЄЄВ, Олександр САФАРОВ, Юлія КОВАЛЬОВА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ ІНФОРМАЦІЙНО- КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ СИСТЕМ ВІЯВЛЕННЯ АТАК.....	20
Георгій КУЛІНЧЕНКО, Петро ЛЕОНТЬЄВ, Андрій ПАНИЧ, Арсен САВЕНКО КЕРУВАННЯ ПІДЙОМОМ ПЛАТФОРМИ БУДІВЕЛЬНОГО ПРИНТЕРА.....	30
Антон МАЛЬЦЕВ МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПЕРЕДБАЧЕННЯ ВЕЛИКИХ ЗАШУМЛЕНИХ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ СУЧАСНИХ МОВ ПРОГРАМУВАННЯ.....	39
Андрій МОРОЗОВ, Тетяна ВАКАЛЮК, Юрій КУБРАК, Денис ЗОСІМОВИЧ АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ.....	44

CONTENTS

Mykhailo BERDNYK, Iryna UDOVYK, Oleksii ALEKSIEIEV, Natalia KAREVINA COMPUTER MODELING OF THE GENERALIZED NEYMAN PROBLEM OF HEAT EXCHANGE OF ROCKET FAIRING.....	3
Vyacheslav GOREV, Alexander GUSEV, Valerii KORNIENKO ON THE ACCURACY OF SOME APPROXIMATIONS FOR THE KOLMOGOROV–WIENER FILTER WEIGHT FUNCTION FOR POWER–LAW STRUCTURE FUNCTION PROCESSES.....	9
Oleg IEMETS, Oksana CHERNENKO, Tatyana PARFONOVA, Olena OLKHOVSKA MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBLEM OF OPTIMAL LOCATION OF PRODUCTIVE FORCES TAKING INTO ACCOUNT THE MINIMUM DAMAGE TO THE ENVIRONMENT.....	14
Valerii KORNIENKO, Oleksandra GERASINA, Dmytro TYMOFIEIEV, Oleksandr SAFAROV, Yuliia KOVALOVA IDENTIFICATION AND PREDICTION OF SELF-SIMILAR TRAFFIC OF INFORMATION AND COMMUNICATION NETWORKS FOR ATTACK DETECTION SYSTEMS.....	20
Heorhii KULINCHENKO, Petro LEONTIEV, Andrii PANYCH, Arsen SAVENKO CONSTRUCTION PRINTER PLATFORM LIFT CONTROL.....	30
Anton MALTSEV METHODS OF MACHINE LEARNING OF THE NEURAL NETWORK TO PREDICT LARGE NOISY DATA USING MODERN PROGRAMMING LANGUAGES.....	39
Andrii MOROZOV, Tetiana VAKALIUK, Yurii KUBRAK, Denys ZOSIMOVYCH ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCING THE ARCHITECTURE OF SOFTWARE SYSTEMS.....	44

НОТАТКИ

INFORMATION TECHNOLOGY: COMPUTER SCIENCE, SOFTWARE ENGINEERING AND CYBER SECURITY

Випуск 1

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Наталія Сергіївна Кузнецова

Формат 60x84/8. Гарнітура Arial.

Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 6,51. Замов. № 0522/203. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.