

О. М. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, М. О. НАДУЄВА, А. І. БУБНОВ

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ЕПІДЕМІЇ НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Розроблені та досліджені математичні моделі епідемії для прогнозу розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 на основі інформаційної технології оптимізації складних динамічних систем. Розглянуті математичні моделі епідемії SIR, SIRS, SEIR, SIS, MSEIR у вигляді нелінійних систем диференціальних рівнянь та проведено аналіз використання математичних моделей для дослідження розвитку епідемії коронавірусу COVID-19. На основі статистичних даних епідемії коронавірусу COVID-19 у Харківській області обчислені початкові значення параметрів моделей останньої хвилі епідемії. З використанням цих моделей програмою системного методу першого ступеня з модуля методів інтегрування інформаційної технології для розв'язання нелінійних систем диференціальних рівнянь проведено імітаційне моделювання процесів розвитку останньої хвилі епідемії. Імітаційне моделювання показує, що кількість здорових людей буде зменшуватись, а кількість інфікованих людей буде зростати. За 12 місяців кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись. Інформаційною технологією оптимізації динамічних систем виконана ідентифікація параметрів моделей епідемії COVID-19 на основі статистичних даних захворювань у Харківській області. З використанням отриманих моделей проведено прогнозування розвитку останньої хвилі епідемії COVID-19 у Харківській області. Наведено процеси розвитку епідемії за SIR-моделлю з імунітетом, що слабшає, зі значеннями параметрів моделі, отриманих в результаті ідентифікації. Приблизно за 13 місяців від початку хвилі епідемії кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись. За 10 місяців все населення Харківської області буде інфіковано. Ці результати дозволяють передбачити можливі варіанти розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 у Харківській області для вчасного проведення адекватних протиепідемічних заходів.

Ключові слова: епідемія, математична модель, диференціальні рівняння, ідентифікація, інформаційна технологія, імітаційне моделювання.

Е. Н. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, М. А. НАДУЕВА, А. И. БУБНОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ

Разработаны и исследованы математические модели эпидемии для прогноза развития эпидемии коронавируса COVID-19 на основе информационной технологии оптимизации сложных динамических систем. Рассмотрены математические модели эпидемий SIR, SIRS, SEIR, SIS, MSEIR в виде нелинейных систем дифференциальных уравнений и проведен анализ использования математических моделей для исследования развития эпидемии коронавируса COVID-19. На основе статистических данных эпидемии коронавируса COVID-19 в Харьковской области вычислены исходные значения параметров моделей последней волны эпидемии. С использованием этих моделей программой системного метода первой степени из модуля методов интегрирования информационной технологии для решения нелинейных систем дифференциальных уравнений проведено имитационное моделирование процессов развития последней волны эпидемии. Имитационное моделирование показывает, что количество здоровых людей будет уменьшаться, а количество инфицированных будет расти. Через 12 месяцев количество инфицированных людей достигнет своего максимума, а затем начнет уменьшаться. Информационной технологией оптимизации динамических систем выполнена идентификация параметров моделей эпидемии COVID-19 на основе статистических данных заболеваний Харьковской области. При использовании полученных моделей проведено прогнозирование развития последней волны эпидемии COVID-19 в Харьковской области. Приведены процессы развития эпидемии по SIR-модели со слабеющим иммунитетом со значениями параметров модели, полученных в результате идентификации. Приблизительно за 13 месяцев от начала волны эпидемии количество инфицированных людей достигнет своего максимума, а затем начнет уменьшаться. Через 10 месяцев все население Харьковской области будет инфицировано. Эти результаты позволят предусмотреть возможные варианты развития эпидемии коронавируса COVID-19 в Харьковской области для своевременного проведения адекватных противоэпидемических мероприятий.

Ключевые слова: эпидемия, математическая модель, дифференциальные уравнения, идентификация, информационная технология, имитационное моделирование.

O. M. NIKULINA, V. P. SEVERYN, M. O. NADUIEVA, A. I. BUBNOV

MODELING THE DEVELOPMENT OF EPIDEMIS BASED ON INFORMATION TECHNOLOGIES OF OPTIMIZATION

Mathematical models of the epidemic have been developed and researched to predict the development of the COVID-19 coronavirus epidemic on the basis of information technology for optimizing complex dynamic systems. Mathematical models of epidemics SIR, SIRS, SEIR, SIS, MSEIR in the form of nonlinear systems of differential equations are considered and the analysis of use of mathematical models for research of development of epidemic of coronavirus epidemic COVID-19 is carried out. Based on the statistics of the COVID-19 coronavirus epidemic in the Kharkiv region, the initial values of the parameters of the models of the last wave of the epidemic were calculated. Using these models, the program of the first-degree system method from the module of information technology integration methods for solving nonlinear systems of differential equations simulated the development of the last wave of the epidemic. Simulation shows that the number of healthy people will decrease and the number of infected people will increase. In 12 months, the number of infected people will reach its maximum and then begin to decline. The information technology of optimization of dynamic systems is used to identify the parameters of the COVID-19 epidemic models on the basis of statistical data on diseases in the Kharkiv region. Using the obtained models, the development of the last wave of the COVID-19 epidemic in Kharkiv region was predicted. The processes of epidemic development according to the SIR-model with weakening immunity are given, with the values of the model parameters obtained as a result of identification. Approximately 13 months after the outbreak of the epidemic, the number of infected people will reach its maximum and then begin to decline. In 10 months, the entire population of Kharkiv region will be infected. These results will allow us to predict possible options for the development of the epidemic of coronavirus COVID-19 in the Kharkiv region for the timely implementation of adequate anti-epidemic measures.

Keywords: epidemic, mathematical model, differential equations, identification, information technology, simulation.

Вступ. Епідемія – це поширення інфекційної і значно перевищує нормально зареєстрований рівень хвороби, яка прогресує в часі та просторі серед людей захворюваності на певній території [1–3]. Епідемії

смертельно небезпечні для людства з давніх часів. Сучасна епідеміологія базується на системному підході й приділяє велику увагу передбаченню можливих варіантів розвитку епідемії для своєчасного проведення адекватних протіепідемічних заходів. Для того, щоб медичні працівники могли краще протистояти епідеміям, створюються математичні моделі для прогнозування розвитку захворювання. Математичні моделі відіграють величезну роль у медичній науці, вони дозволяють передбачати розвиток епідемії і є дуже важливими в наш час [4–7]. Математичні моделі розвитку епідемії широко використовуються для дослідження епідемії коронавірусу COVID-19 у різних країнах [8].

Процеси розвитку епідемії динамічні. Тож актуальним є питання побудови моделей прогнозування динаміки розвитку епідемії. Для цього доцільно використати інформаційну технологію оптимізації (ІТО) складних динамічних систем, що включає модуль інтегрування систем диференціальних рівнянь (СДР), модуль критеріїв ідентифікації та оптимізації, блок методів оптимізації та інші [9–11].

Мета даної статті полягає в розробці та дослідженні математичних моделей розвитку епідемії для прогнозу розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 на основі інформаційної технології оптимізації.

Для досягнення поставленої мети проведено аналіз різних моделей епідемії, наводяться статистичні дані розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 у Харківській області, виконується ідентифікація параметрів моделей епідемії на основі інформаційної технології оптимізації, за отриманими моделями проводиться імітаційне моделювання розвитку епідемії COVID-19 у Харківській області.

Аналіз моделей епідемії. Проаналізуємо різні моделі епідемії. Найбільш розповсюджена модель епідемії SIR має вигляд СДР [1]:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta SI, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I, \end{aligned} \quad (1)$$

де t – час;

S – кількість сприйнятливих осіб;

I – кількість інфікованих осіб;

R – кількість людей, які були інфіковані;

β – швидкість захворювання;

γ – швидкість одужання інфікованих осіб.

Модель (1) описує незмінність популяції та не враховує смертність від хвороби. Отже для неї використовується умова

$$\frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0.$$

Розвитком моделі SIR є, зокрема, такі моделі:

SIRS – «сприйнятливий – інфікований – вилікуваний – сприйнятливий», модель для опису динаміки захворювання з тимчасовим імунітетом (особи,

які вилікувалися, зрештою знову стають сприйнятливими);

SEIR – «сприйнятливий – експонований – інфікований – вилікуваний», модель для опису поширення захворювань з інкубаційним періодом;

SIS – «сприйнятливий – інфікований – сприйнятливий», модель поширення захворювання, до якого не виробляється імунітет;

MSEIR – «Імунітет, отриманий від матері – чутливий – підданий впливу – інфікований – вилікуваний», модель, яка враховує імунітет дітей набутий в утробі матері.

Модель SIS, коли перенесене інфекційне захворювання надає нетривалий імунітет, має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \gamma I - \beta SI, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I. \end{aligned} \quad (2)$$

Для визначення динаміки інфекційного захворювання в достроковій перспективі враховують демографічні процеси з припущенням, що є природний період тривалості життя $1/\mu$ років. Швидкість, з якою особи вмирають від природних причин, задається параметром μ , що представляє «грубу» оцінку народжуваності населення. З цим припущенням, отримана узагальнена SIR-модель:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \mu - \beta SI - \mu S, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I - \mu I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \mu R. \end{aligned} \quad (3)$$

SIR та SIS моделі з точки зору епідеміології є двома крайніми моделями інфекцій, де імунітет або є протягом усього життя, або його немає зовсім. Проміжним є припущення, що імунітет триває протягом обмеженого періоду перед тим, як почне слабшати, а індивід знову стає сприйнятливим до нових випадків інфікування, що виражається у СДР:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta SI + wR, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - wR, \end{aligned} \quad (4)$$

де w – швидкість, з якою втрачається імунітет.

Аналіз розвитку епідемії за статистичними даними. Як приклад моделювання процесу розвитку епідемії розглянуто розвиток епідемії COVID-19 у Харківській області. За статистичними даними усе населення Харківської області складає 2612 тисяч людей, усього заражень – 8,8 %, померли – 2,3 %, одужали – 82,4 % [12]. Відносні значення змінних величин епідемії приведені в табл. 1, де I – відносна кількість захворювань, R – відносна кількість одужань, S – відносна кількість здорових людей, dI , dR і

Таблиця 1 – Відносні значення змінних величин епідемії

Місяці/рік	I	R	S	dI	dR	dS
Березень, 2020	3,82848E-07	0	1	0	0	0
Квітень, 2020	9,49464E-05	9,19E-06	0,999896	9,45636E-05	9,18836E-06	-0,0001
Травень, 2020	0,000312787	0,000147	0,999541	0,000217841	0,000137443	-0,00036
Червень, 2020	0,000408882	0,000291	0,999301	9,60949E-05	0,000143951	-0,00024
Липень, 2020	0,000603752	0,000426	0,99897	0,00019487	0,000135528	-0,00033
Серпень, 2020	0,002053982	0,000454	0,997492	0,00145023	2,79479E-05	-0,00148
Вересень, 2020	0,00367611	0,000472	0,995852	0,001622129	1,7611E-05	-0,00164
Жовтень, 2020	0,006745406	0,000973	0,992281	0,003069296	0,000501531	-0,00357
Листопад, 2020	0,007290965	0,009931	0,982778	0,000545559	0,008957504	-0,0095
Грудень, 2020	0,00537366	0,009366	0,98526	-0,0019173	-0,00056432	0,002482
Січень, 2021	0,003279096	0,004979	0,991742	-0,00209456	-0,00438783	0,006482
Лютий, 2021	0,002248469	0,002917	0,994835	-0,00103063	-0,00206202	0,003093
Березень, 2021	0,007652757	0,003247	0,989101	0,005404288	0,000330015	-0,00573
Квітень, 2021	0,012337289	0,00894	0,978723	0,004684533	0,005693338	-0,01038
Травень, 2021	0,004129403	0,010717	0,985154	-0,00820789	0,001776799	0,006431
Червень, 2021	0,000658116	0,003641	0,995701	-0,00347129	-0,0070758	0,010547
Липень, 2021	0,000352986	0,000426	0,999221	-0,00030513	-0,00321478	0,00352
Серпень, 2021	0,000985835	0,000461	0,998553	0,000632848	3,52221E-05	-0,00067
Вересень, 2021	0,00514242	0,001438	0,99342	0,004156585	0,000976646	-0,00513
Жовтень, 2021	0,015678407	0,007633	0,976688	0,010535988	0,006195253	-0,01673

dS – відповідні прирости. Графік відносної кількості заражень по місяцям показано на рис. 1. Остання хвиля епідемії почалася у липні 2021 року.

За даними останніх двох місяців з таблиці шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь обчислені початкові значення параметрів моделей епідемії (1)–(4): $\beta = 1,09623$, $\gamma = 0,395146$, $\mu = 0,014085$, $w = 0,08$.

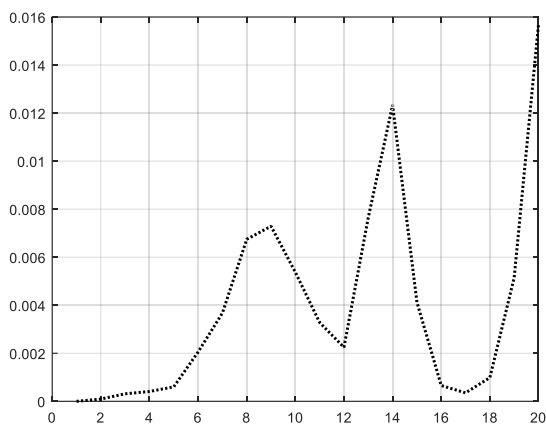


Рис. 1. Динаміка відносної кількості заражень COVID-19 у Харківській області

За даними останніх двох місяців з таблиці шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь обчислені початкові значення параметрів моделей епідемії (1)–(4): $\beta = 1,09623$, $\gamma = 0,395146$, $\mu = 0,014085$, $w = 0,08$.

З використанням блоку подання інформації розв'язання задач ІТО отримані процеси розвитку епідемії на основі різних моделей епідемії програмою системного методу першого ступеня з модуля методів інтегрування для розв'язання нелінійних СДР. Початкові дані для усіх моделей відповідають даним за липень 2021 року.

Процеси на рис. 2 представляють динаміку змінних стану SIR-моделі зі сталою популяцією в залежності від часу в місяцях: S – відносна кількість здорових людей, I – відносна кількість інфікованих людей. Ці графіки показують, що кількість здорових людей буде зменшуватись, а кількість інфікованих людей буде зростати. За 12 місяців кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись.

Процеси на рис. 3 представляють динаміку змінних стану SIR-моделі з імунітетом, що слабшає, в залежності від часу в місяцях: S – відносна кількість здорових людей, I – відносна кількість інфікованих людей, R – відносна кількість людей, що одужали. Ці графіки показують, що кількість здорових людей буде

зменшуватись трохи швидше ніж за попередньої моделлю, а кількість інфікованих людей буде зростати менше, також буде менше зростати кількість людей, що одужали. За 12 місяців кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись.

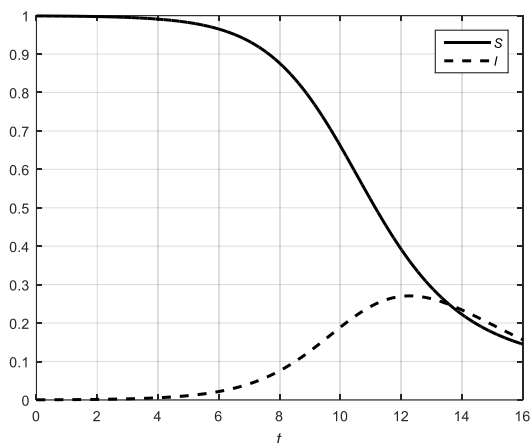


Рис. 2. Розвиток епідемії за SIR-моделлю зі сталою популяцією

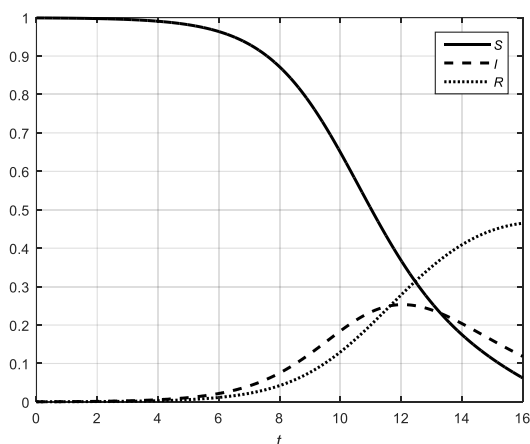


Рис. 3. Розвиток епідемії за SIR-моделлю зі сталою популяцією

Ідентифікація параметрів моделей епідемії.

Для підвищення точності моделей розвитку епідемії поставлена задача ідентифікації параметрів моделей. За натурні дані процесу епідемії обрані дані відносної кількості інфікованих людей за 4 місяці останньої хвилі епідемії, тобто з липня по жовтень 2021 року. За цими даними і за конкретною моделлю епідемії сформована функція нев'язки, яка мінімізується програмою метода оптимізації з блоку методів оптимізації ІГО.

На рис. 4 показаний процес ідентифікації параметрів SIR-моделі зі сталою популяцією методом Нелдера – Міда за змінною кількості хворих I у просторі двох змінних параметрів $x_1 = \beta$ і $x_2 = \gamma$, що складається з кращих точок пошуку, отриманий з використанням модуля `viewgraph` з блоку подання інформації розв'язання задач інформаційною системою OPTLAB. Початкова точка пошуку

$x_0(1,0926; 0,3951)$ позначена колом, кінцева точка позначена ромбом.

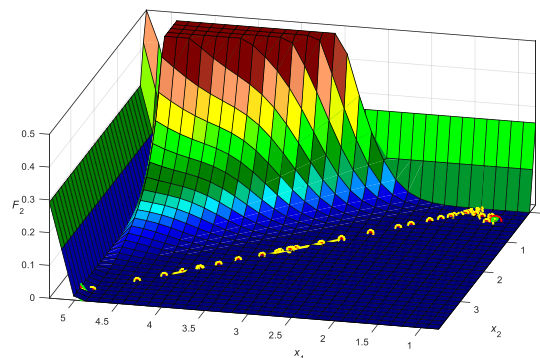


Рис. 4. Розвиток епідемії за SIR-моделлю зі сталою популяцією

На рис. 5 показані процеси за SIR-моделлю зі сталою популяцією: y_E позначає експериментальний процес, y_0 – процес в початковій точці пошуку, y – процес в кінцевій точці при ідентифікованих значеннях параметрів. По горизонтальній осі відкладено час у місяцях, по вертикальній – відносна величина кількості захворілих.

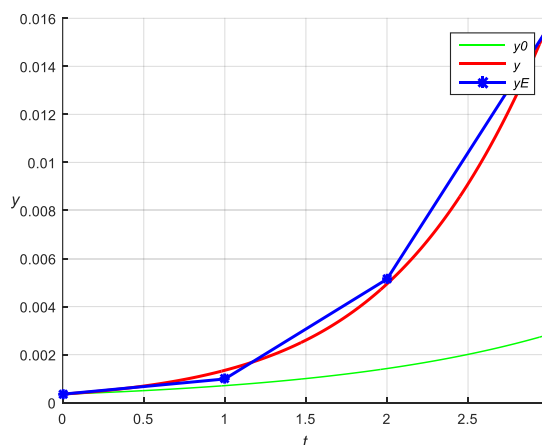


Рис. 5. Початковий, кінцевий та експериментальний процеси зміни кількості захворілих за SIR-моделлю зі сталою популяцією

Прогнозування епідемії COVID-19. На основі проведеного системного підходу до моделювання процесів розвитку епідемії COVID-19 у Харківській області розроблені адекватні математичні моделі, які відповідають експериментальним даним та можуть бути використані для прогнозування розвитку епідемії COVID-19 у Харківської області. Оскільки остання хвиля епідемії почалася у липні 2021 року, то початкові дані для усіх моделей відповідають даним за липень 2021 року і для відносних змінних стану моделей є нульовими.

На рис. 6 показано процеси розвитку епідемії за SIR-моделлю з імунітетом, що слабшає, зі значеннями параметрів моделі, отриманих в результаті ідентифікації. Ці графіки теж показують, що кількість здорових людей буде зменшуватись, а кількість інфікованих людей буде зростати. Приблизно за 13 місяців

від початку хвилі епідемії кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись. За 10 місяців все населення Харківської області буде інфіковано.

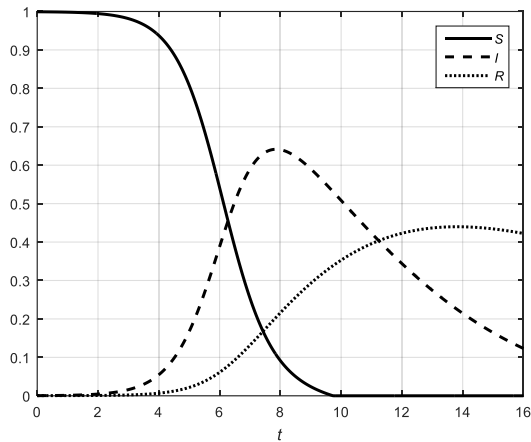


Рис. 6. Початковий, кінцевий та експериментальний процеси зміни кількості захворілих за SIR-моделлю зі сталою популяцією

Ці результати дозволять передбачити можливі варіанти розвитку епідемії для вчасного проведення адекватних протиепідемічних заходів.

Висновки. Дана стаття присвячена розробці та дослідженню математичних моделей епідемії для прогнозу розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 на основі інформаційної технології оптимізації динамічних систем. Результати проведених досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Розглянуті різні математичні моделі епідемії у вигляді нелінійних систем диференціальних рівнянь та проведено аналіз використання математичних моделей для дослідження розвитку епідемії коронавірусу COVID-19.

2. На основі статистичних даних епідемії COVID-19 у Харківській області обчислені початкові значення параметрів моделей епідемії. З використанням цих моделей проведено імітаційне моделювання процесів розвитку останньої хвилі епідемії.

3. Інформаційною технологією оптимізації динамічних систем виконана ідентифікація параметрів моделей епідемії COVID-19 на основі статистичних даних захворювань у Харківській області. З використанням отриманих моделей проведено прогнозування розвитку останньої хвилі епідемії COVID-19 у Харківській області.

Список літератури

1. Kermack W. O., McKendrick A. G. A *Contribution to the mathematical theory of epidemics*. URL: <https://www.jstor.org/stable/94815> (дата звернення: 07.10.2021).
2. Begon M., Bennett M., Bowers R. G., French N. P. A *clarification of transmission terms in host-microparasite models: numbers, densities and areas*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12211582/> (дата звернення: 10.10.2021).
3. Anderson R., May R. *Infectious diseases of humans: dynamics and control*. <https://www.amazon.com/Infectious-Diseases-Humans-Dynamics-Control/dp/019854040X> (дата звернення: 11.11.2021).

4. Gray A., Greenhalgh D., Mao X., Pan J. *The SIS epidemic model with markovian switching*. URL: <http://strathprints.strath.ac.uk/41322> (дата звернення: 10.10.2021).
5. Иванов М. В. *Математическое моделирование процесса пандемии: теория и практика*. URL: <https://indsi.ru/2020/04/30/matematicheskoe-modelirovaniyeprocessa/> (дата звернення: 20.11.2021).
6. Авилков К. *Математическое моделирование в эпидемиологии как задача анализа сложных данных*. URL: <http://download.yandex.ru/company/experience/seminars/KAvilovm/atmodelirovanie.pdf> (дата звернення: 17.11.2021).
7. Allen L. J. S. *An Introduction to stochastic epidemic models*. URL: <http://eaton.math.rpi.edu/csums/papers/epidemic/allenstochasticepidemic.pdf> (дата звернення: 13.10.2021).
8. Іващенко Д. С., Куценко О. С. Огляд і аналіз методів моделювання процесу розвитку епідемії. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 1 (5). С. 16–19.
9. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В. Розробка інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 63–69.
10. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В. Модуль представлення інформації для технології оптимізації систем автоматичного управління. *Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019. Ч. I*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. С. 36.
11. Никулина Е. Н., Северин В. П., Коцюба Н. В. Идентификация и анализ устойчивости контуров автоматического регулирования энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000. *Тезисы докладов XXV Международная конференция з автоматического управления Автоматика-2018*. Львів: Львівська політехніка, 2018. С. 54–55.
12. *Статистичні дані* // <https://index.minfin.com.ua/reference/coronavirus/ukraine/harkovskaya/> (дата звернення: 10.11.2021).

References (transliterated)

1. Kermack W. O., McKendrick A. G. A *Contribution to the mathematical theory of epidemics*. URL: <https://www.jstor.org/stable/94815> (accessed 07.10.2021).
2. Begon M., Bennett M., Bowers R. G., French N. P. A *clarification of transmission terms in host-microparasite models: numbers, densities and areas*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12211582/> (accessed 10.10.2021).
3. Anderson R., May R. *Infectious diseases of humans: dynamics and control*. <https://www.amazon.com/Infectious-Diseases-Humans-Dynamics-Control/dp/019854040X> (accessed 11.11.2021).
4. Gray A., Greenhalgh D., Mao X., Pan J. The SIS epidemic model with markovian switching. URL: <http://strathprints.strath.ac.uk/41322> (accessed 10.10.2021).
5. Ivanov M. V. *Matematicheskoe modelirovanie processa pandemii: teoriya i praktika* [Mathematical modeling of the pandemic process]. Available at: <https://indsi.ru/2020/04/30/mathematical-modelingprocess/> (accessed 20.11.21).
6. Avilov K. *Matematychnye modelivannia v epidemiologii yak zavdannia analizu skladnykh danykh*. [Mathematical modeling in epidemiology as a problem in the analysis of complex data]. Available at: <https://indsi.ru/2020/04/30/matematicheskoe-modelirovaniyeprocessa/> (accessed 20.11.2021).
7. Allen L. J. S. *An Introduction to stochastic epidemic models*. URL: <http://eaton.math.rpi.edu/csums/papers/epidemic/allenstochasticepidemic.pdf> (accessed 13.10.2021).
8. Ivashchenko D. S., Kutsenko O. S. Oglyad i analiz metodov modeluvannya protsesu rozvetku epidemiyi [Overview and analysis of methods for modeling the epidemic development process]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 1 (5), pp. 16–19.
9. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Rozrobka informatsiynoi tekhnologii optymizatsii upravlinnya skladnymy

- dynamichnymy systemamy [Development of information technology for optimizing the control of complex dynamic systems]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 63–69.
10. Nikulina O. M., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Modul predstavleniya informatsiyi dlya tehnologiyi optymizatsiyi system avtomatychnogo upravlinnya [Information presentation module for automatic control systems optimization technology]. *Tezy dopovidey XXVII mighnorodnoyi naurovo-praktychnoyi konferentsiyi MicroCAD–2019. Ch. I.* [Abstracts of the XXVII International Scientific and Practical Conference "MicroCAD–2019". Vol. 2]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, p. 36.
11. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Identifikatsiya s analiz ustoychivosti konturov avtomaticheskogo regulirovaniya energoblokov AES s reaktorami VVER-1000 [Identification and Analysis of stability of automatic control loops for NPP power units with VVER-1000 reactors.]. *Tezy dopovidey XXV mighnorodnoyi naurovo-praktychnoyi konferentsiyi Avtomatika–2018.* [Abstracts of the XXV International Scientific and Practical Conference "Automatics–2018"]. Lviv, Lviv Polytechnic Publ., 2018, pp. 54–55.
12. *Statistics* // <https://index.minfin.com.ua/reference/coronavirus/ukraine/harkovskaya/> (accessed 10.11.2021).

Надійшла (received) 29.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Нікуліна Олена Миколаївна – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Северин Валерій Петрович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

Надуєва Марія Олексівна – студентка кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6096-7112>; e-mail: Mariia.Naduieva@cs.khpi.edu.ua

Бубнов Антон Ігорович – студент кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua

Нікуліна Елена Николаевна – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Северин Валерій Петрович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

Надуева Мария Алексеевна – студентка кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6096-7112>; e-mail: Mariia.Naduieva@cs.khpi.edu.ua

Бубнов Антон Игоревич – студент кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua

Nikulina Olena Mykolaivna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Severyn Valeriy Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department System Analysis and Information-Analytical Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

Naduieva Mariia Oleksivna – Student of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6096-7112>; e-mail: Mariia.Naduieva@cs.khpi.edu.ua

Bubnov Anton Ihorovich – student of Department Computer mathematics and data analysis National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua