

УДК 620.16.63

МЕТОДИКА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

*Руслан Барабаш, к. т. н., Андрій Шарибура, к. т. н.,
Володимир Чухрай, к. т. н., Микола Михалюк, к. т. н.*

*Львівський національний університет природокористування
вул. Володимира Великого, 1, м. Дубляни, Жовківський р-н, Львівська обл., Україна
e-mail: rbarabash@ukr.net, ascharibura@gmail.com, gazowod@ukr.net,
v.chukrai@gmail.com, rysvasyl@gmail.com, levchuklnau@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2024.28.233>

Барабаш Р., Шарибура А., Чухрай В., Михалюк М. Методика імітаційного моделювання технологічних процесів технічного обслуговування

Представлена методика дає змогу для врахування таких структурних особливостей ТП ТО, як обмеження на черговість виконання операцій і розміщення робочих зон об'єкта обслуговування.

Процес моделювання створює умови для забезпечення: реалізації важливих теоретичних положень про взаємозалежність різних параметрів ТП ТО (фронту ТО f , кількості робітників u і обладнання різних типів K_r), а також взаємозалежності різних показників ефективності ТП (тривалості $T_{T,П}$ коефіцієнтів використання фондів робочого часу робітників η_u і обладнання η_r); автоматизованого розрахунку параметрів і показників ефективності ТП та техніко-економічних показників; отримання початкових даних для синтезу параметричних рядів виробничих структур різної продуктивності, визначення максимальної та оптимальної продуктивності.

Для імітаційного моделювання ТП ТО автомобілів, тракторів, мобільної техніки та їхніх гідравлічних систем у середовищі *Net Beans IDE* розроблено систему автоматизованого проектування. Вихідними даними для моделювання є кількість: ЕТО та їх зміст, робочих зон, в яких вони проводяться, типів обладнання, норм часу на операції та пріоритету виконання тих чи інших операцій. Необхідно знайти мінімальний час $T_{T,П}$, за який можна виконати N операцій, на які накладено виразу виробничо-технологічну структурність.

Цей алгоритм дає змогу отримати такий розпис операцій, за якого тривалість технологічного циклу є мінімальною за одночасного досягнення максимального можливих значень їх коефіцієнтів використання. Такий розподіл здійснюється з дотриманням таких обмежень: по-перше, в одній робочій зоні одночасно може виконуватися операція лише одним виконавцем і одним типом обладнання, тому операції, які просторово розміщені в одній робочій зоні, у невпорядкованій моделі можуть розташовуватися лише послідовно, але не паралельно; по-друге, розподіл операцій між виконавцями та обладнанням здійснюють без порушення часових та міжопераційних зв'язків; по-третє, потрібно досягнути мінімуму втрат робочого часу виконавців під час переміщень їх навколо об'єкта та в інші робочі зони.

Описаний алгоритм дозволяє виконувати багато випадкових симуляцій побудови розв'язків. Кожен із розв'язків є відмінним, оскільки для вибору операцій, які будуть виконуватися, використовується генератор рівномірного розподілу випадкових величин.

Ключові слова: алгоритм, методика, технічне обслуговування, операція, параметр, тривалість.

Barabash R., Sharybura A., Chukhray V., Mykhaliuk M. Methodology of the simulation modeling of maintenance technological processes

The proposed technique takes into account various structural features of TP maintenance, such as restrictions on the sequence of operations and the arrangement of work areas within the service facility.

The modeling process establishes conditions for ensuring: 1. the implementation of key theoretical principles regarding the interdependence of different parameters involved in maintenance operations, including the maintenance front (f), the number of workers (u), and the equipment types (K_r). It also considers the interdependence of various indicators related to maintenance efficiency, such as the duration of the technological process ($T_{T,P}$) and the utilization coefficients for labor (η_u) and equipment (η_r); 2. automated calculation of parameters and performance indicators related to maintenance efficiency and technical-economic metrics; 3. the generation of initial data required for synthesizing parametric series of production structures with varying productivity levels, thereby determining maximum and optimal productivity.

An automated design system has been developed within the *NetBeans IDE* environment for simulating the maintenance and repair of cars, tractors, mobile machinery, and their hydraulic systems. The initial data for modeling include the number of maintenance tasks (ETOs) and their characteristics, the work areas where these tasks are conducted, types of equipment, time norms for operations, and the priority of executing specific tasks. The aim is to find the minimum time ($T_{T,P}$) required to complete N operations, given a distinct production and technological structure. This algorithm facilitates the creation of an operation schedule that minimizes the duration of the technological cycle while maximizing the utilization rates of workers and equipment. This scheduling must adhere to several constraints: first, only one operator and one type of equipment can perform an operation in a given work area at the same time, meaning that operations located within the same work area cannot be executed in parallel; second, the distribution of operations among performers and equipment must maintain the integrity of time and operational

connections; and third, efforts should be made to minimize the loss of workers' time as they move around the site and between work areas.

The described algorithm is capable of conducting numerous random simulations to generate different solutions. Each solution varies because a uniform random variable generator is utilized to select the operations for execution.

Keywords: algorithm, technique, maintenance, operation, parameter, duration.

Постановка проблеми. Скоротити тривалість ТП ТО об'єкта можна залученням більшої кількості робітників u , ремонтно-технологічного обладнання K_r та збільшенням постів f . Але в цьому разі ускладнюється визначення тривалості ТП ТО T_{TL} і показників ефективності використання фонду робочого часу виконавців та обладнання. Традиційно вся сукупність робіт, яку потрібно виконати під час ТО об'єкта, розглядалася як єдиний неподільний ТП з відомою трудомісткістю і кількістю обладнання ($K_r=1$) та здебільшого стосувалась одного виконавця. Під час залучення допоміжних виконавців з метою скорочення тривалості ТО загальна нормативна трудомісткість ділилась між ними навпіл. Такий розподіл не враховував неминучих простоїв робітників, які виникали внаслідок часових і просторових обмежень на виконання операцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями імітаційного моделювання та створення алгоритмів для проектування технологічних процесів ремонту, розбирання-складання машин розглядалися в роботах Семковича О. Д., Роговського І. Л., Кузьмінського Р. Д., Флиса І. М. та багато інших вчених. Однак системного наукового підходу до вирішення задач оптимізації виробничої структури технічного обслуговування, імітаційного моделювання та створення алгоритмів для ТП ТО загалом не створено [1; 3; 5; 7-9].

Аналіз теоретичних підходів до розрахунку обсягів робіт, які можуть бути виконані в умовах нестаціонарного потоку вимог та обсягів втрат показують, що методики оптимізації ТП ТО сьогодні не мають достатньої завершеності та придатності до практичного використання.

Множинні методи не дозволяють безпосередньо отримати оцінку максимальної правдоподібності, проте вони дають можливість багаторазово змодельовати стан системи та опрацювати результати відомими методами статистичної оцінки інформації. Достовірність оцінки у цьому випадку визначатиметься якістю вихідних даних, оскільки система може набувати безліч різних варіантів та станів.

Розроблені методи імітаційного моделювання оптимізації ТП, не враховують значну кількість обмежень, що накладаються на ТП ТО, що ускладнює їх використання. Досі вибір оптимального рішення здійснюється шляхом

порівняльної оцінки невеликої кількості варіантів, які можуть бути реалізовані у конкретній виробничій ситуації. Подібні підходи засновані лише на технічному аспекті аналізу можливих варіантів вирішення та не можуть бути застосовані при розрахунку завантаженості стаціонарних постів та втрат.

Враховуючи відносно короткий ретроспективний період протягом якого йде формування ринку послуг технічного сервісу в Україні, доцільно застосувати для розрахунку завантаження постів та втрат евристичний алгоритм моделювання. Перевагою методу є більш простий та зручний метод підготовки вихідних даних, гнучкість розрахунків, що дозволяє використовувати генератор рівномірного розподілу випадкових величин.

Постановка завдання. Для визначення залежності параметрів ТП ТО та показників його ефективності (а також інших простоїв, пов'язаних із ТО, у яких можна застосувати бригадний метод організації праці) від кількості залучених виконавців, обладнання та постів – розробити методику, яка ґрунтується на структурному моделюванні процесу на ЕОМ і складається з таких етапів:

1. Визначення максимальної кількості робочих зон для суб'єктів праці з врахуванням антропологічних даних людини, а також конструкторської машини.

2. Визначення переліку технологічних операцій та їхньої тривалості.

3. Формування та занесення в пам'ять ЕОМ первинних даних для моделювання.

4. Моделювання процесів на ЕОМ та аналіз його результатів.

Виклад основного матеріалу. Для імітаційного моделювання ТП ТО різних об'єктів у середовищі *Net Beans IDE* розроблено систему автоматизованого проектування.

Вихідними даними для моделювання є кількість: ЕТО та їх зміст; робочих зон, в яких вони проводяться; типів обладнання; норм часу на операції та пріоритету виконання тих чи інших операцій.

Необхідно знайти мінімальний час T_{TL} , за який можна виконати N операцій, на які накладено виразну виробничо-технологічну структурність.

Представимо послідовність операцій як множину $O_{pi} = \{O_{p1}, O_{p2}, \dots, O_{pn}\}$. Кожна з опе-

рацій O_{pi} має заданий порядковий номер id_i , тривалість виконання t_i , номер робочої зони z_i , тип інструменту e_i та множину операцій $p_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\}$, які необхідно виконати до моменту виконання поточної операції. Час завершення операції позначимо через t_{ei} .

Для спрощення логічних перетворень використаємо позначення реєстрів вільних зон навколо об'єкта FZ (*free zone*) = $\{fz_1, \dots\}$, працівників FW (*free workers*) = $\{fw_1, \dots\}$, обладнання FE (*free equipment's*) = $\{fe_1, \dots\}$, переліку операцій, які виконуються $OPIP$ (*operations in progress*) = $\{opip_1, \dots\}$, операцій, які можуть

виконуватися ROP (*reachable operations*) = $\{rop_1, \dots\}$ та множину можливих операцій, які можуть бути виконані на наступному етапі PM (*possible moves*), – це означає, що усі необхідні операції, які необхідно попередньо виконати, вже є завершені. Поточний час системи позначимо через T . Для розв'язку задачі необхідно запустити симуляцію процесу для M випадкових розкладів.

Формування розкладу операцій між відомою кількістю виконавців, обладнання та постів здійснюють за алгоритмом структурного моделювання процесів ТО об'єкта (рис. 1).

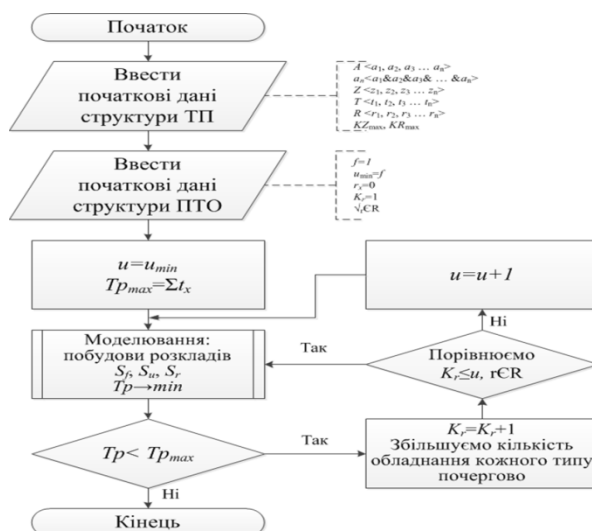


Рис. 1. Алгоритм моделювання технологічних процесів ТО, які виконуються на стаціонарних постах
 Fig. 1. Algorithm for modeling maintenance technological processes performed at stationary stations

Цей алгоритм дає змогу отримати такий розпис операцій, за якого тривалість технологічного циклу є мінімальною за одночасного досягнення максимально можливих значень їх коефіцієнтів використання. Такий розподіл здійснюється з дотриманням таких обмежень: по-перше, в одній робочій зоні одночасно може виконуватися операція лише одним виконавцем і одним типом обладнання, тому операції, які просторово розміщені в одній робочій зоні, у невпорядкованій моделі можуть розташовуватися лише послідовно, але не паралельно; по-друге, розподіл операцій між виконавцями та обладнанням здійснюють без порушення часових та міжопераційних зв'язків; по-третє, потрібно досягнути мінімуму втрат робочого часу виконавців під час переміщень їх навколо трактора та в інші робочі зони.

Алгоритм роботи системи пошуку рішення для фіксованої кількості робітників, ремонтно-технологічного обладнання та постів

Для розв'язання задачі використовується наступний алгоритм пошуку рішення:

Крок 1. Внесення множини даних у систему та їх зчитування. Визначення операцій, які можуть бути виконані невідкладно. Для цього необхідно перевірити усі операції O_{pi} та вибрати ті, в яких множина операцій становить $p_i = \{\}$. У разі виявлення таких операцій додати їх до реєстру операцій, які можуть виконуватися ROP .

Крок 2. Якщо є невиконані чи незакінчені операції, то переходимо до наступного кроку 3, якщо навпаки, то до кроку 6. Для цього перевіряємо, чи $OPIP \langle \rangle \{\}$ і $ROP \langle \rangle \{\}$ мають порожні списки.

Крок 3. Знайти усі можливі невиконані операції, які можна негайно виконати. Для цього необхідно очистити список PM від елементів. Після цього необхідно переглянути всі операції зі списку досяжних операцій. Вибраємо поточну операцію O_{pi} , перевіряємо у відповідних реєстрах (FW, FZ, FE), чи є вільні працівники для виконання даної операції fw_i , необхідна зона fz_i та обладнання fe_i . У разі, коли виконується умова наявності вільного робітника, обладнання та зони, додаємо операцію O_{pi} до списку PM .

Крок 4. Якщо є вільні робітники, обладнання та зони для виконання операції, переходимо до кроку 3, якщо ні, то до кроку 5 (у цьому випадку не відбуватимуться простої робітників, якщо є операції, які можна виконати в поточний момент часу).

Для цього перевіряється, чи є об'єкти в реєстрі вільних робітників FW і операції в списку PM . У разі, коли виконуються обидві умови, використаємо генератор рівномірного розподілу випадкових величин для вибору номера операції x , яка буде надалі виконуватись. Додаємо операцію O_{px} до списку $OPIP$ та фіксуємо час початку виконання даної операції. Вилучаємо перший елемент із FW , знаходимо перше входження fz_x і fe_x та вилучаємо їх із реєстрів FZ та FE . Фіксуємо час завершення операції $t_{ei}=T+t_i$.

Крок 5. З масиву операцій, які перебувають у процесі виконання, вибираємо ті, які найшвидше завершаються. Після їх завершення \rightarrow перехід до кроку 2.

Перевіряємо операції в реєстрі $OPIP$, знаходимо O_{pi} у множині $OPIP$, час завершення яких є найшвидший і дорівнює тривалості T . Завершуємо всі операції з тривалістю T та вивільнюємо працівників, робочі зони і обладнання. Проводимо вибірку всіх операцій, які є у реєстрі $OPIP$, якщо віднаходимо операцію O_{pi} , яка завершується в часі T_{ei} , вилучаємо її з цього реєстру. Незадіяних працівників, обладнання та вільні робочі зони вносимо у відповідні реєстри (FW , FZ , FE).

Обираємо всі операції O_{pi} , над якими не проводилося жодних дій і які відсутні в реєстрах $OPIP$ та PM . Для кожної операції O_{pi} з цього списку перевіряємо умову виконання операцій із множини P_i , якщо умова виконується, то додаємо її до реєстру PM .

Крок 6. Обчислити загальну тривалість процесу. Знайдений найкращий результат фіксуємо, одержимо значення змінної T , в якій записано час завершення останньої операції. У разі, коли $T < T_{min}$, знайденого нами на поточній ітерації, відбувається переприсвоєння значень $T_{min}=T$ та збереження послідовності виконання операцій у списку O_{pmin} .

Крок 7. Якщо умова виконання заданої кількості симуляцій процесу відбулася, то переходимо до кроку 8, якщо ні, то до кроку 2 (перезапуск пошуку рішення). Перевіряємо кількість симуляцій процесу, якщо їхня кількість рівна M , завершуємо пошук, якщо ні, відбувається перезапуск симуляції процесу, поточний час якої знову рівний 0.

Крок 8. Вибрати мінімальну тривалість процесу T_{min} та вивести результати (послідовність виконання операцій), які збережені у O_{pmin} .

Алгоритм роботи системи пошуку рішення для різноманітної конфігурації системи

Для розв'язання задачі використовується такий алгоритм пошуку рішення:

Необхідно згенерувати можливі конфігурації залучення працівників, обладнання та постів для виконання роботи. Для кожного варіанта конфігурації необхідно знайти мінімальний час T_{TL} реалізації системи пошуку рішень.

З цією метою задається максимальна кількість працівників W_{max} та різнотипного обладнання $E_{max}=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. Можливі варіанти конфігурації системи зберігаються в списку S . Кожний з елементів множини s_i містить кількість працівників sw_i , обладнання se_i , поле для збереження найкращого часу виконання роботи заданої конфігурації системи st_i та послідовність виконання операцій sop_i .

Для розв'язку задачі використовується такий алгоритм пошуку варіантів конфігурації системи та тривалості її виконання:

Крок 1. Зчитати обмеження на пошук, зафіксувати кількість працівників.

На цьому кроці задається кількість W_{max} та E_{max} та початкове значення кількості працівників W .

Крок 2. Згенерувати усі варіанти залучення обладнання для заданої кількості робітників.

Для W шукають усі можливі варіанти розбиття кількості обладнання se_i так, щоб жоден se_i не перевищував W . До кожного з можливих варіантів e_i , кількості працівників W та множини S додається такий елемент se , за умови, що $se=e_i$ та $sw=W$.

Крок 3. Вибрати варіант залученого обладнання, запустити систему розв'язку для фіксованої кількості робітників, обладнання і робочих зон. Зберегти результати.

Послідовно вибирається варіант S_i . Цей варіант S_i використовується як вхідні дані для системи пошуку розв'язку для фіксованої кількості робітників та обладнання, яка описана вище. Відбувається пошук часу виконання для заданої конфігурації S_i . Час виконання роботи зберігається в st_i , а послідовність операцій зберігається в sop_i .

Крок 4. Якщо вичерпано всі варіанти залучення обладнання, то переходимо до кроку 5, якщо ні, то повертаємося до кроку 3.

Крок 5. Збільшити кількість робітників W .

Крок 6. Якщо залучено максимальну кількість робітників, то переходимо до кроку 7, якщо ні, то до кроку 2.

У разі, коли $W > W_{max}$, необхідно завершити пошук, бо перевищено максимальну кількість робітників та знайдено і обчислено

всі можливі варіанти.

Крок 7. Вивести результати роботи.

Для кожного S_i з множини S необхідно вивести час виконання операції st_i , послідо-

вність виконання операції sop_i , кількість працівників sw_i та доступне обладнання se_i .

Після виконання описаного алгоритму отримуємо всі можливі конфігурації та час виконання роботи для кожного з варіантів.

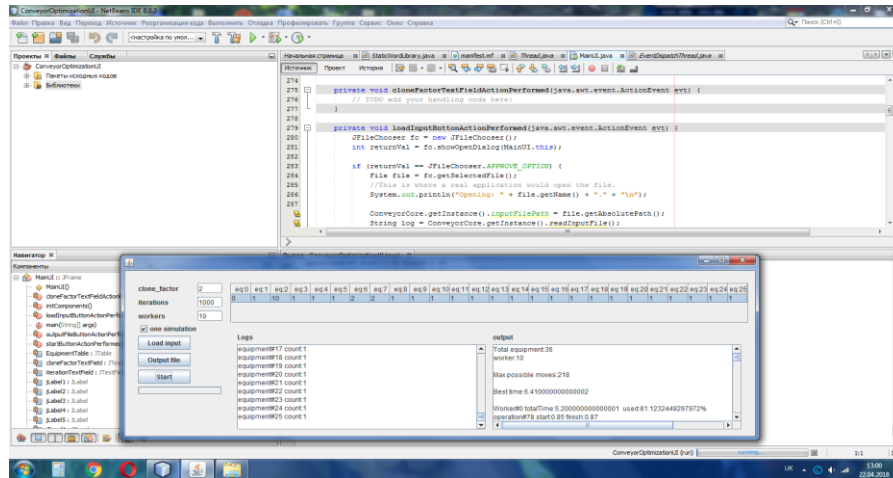


Рис. 2. Інтерфейс системи автоматизованого проектування ТП ТО

Fig. 2. Interface of the system of automated design of TP TO

Висновки. Розроблено методику моделювання ТП ТО, які виконуються на стаціонарних постах, алгоритм моделювання технологічних процесів та програмне забезпечення його реалізації на ЕОМ.

Методика дає можливість моделювання ТП ТО, на відміну від процесу ремонту та розбирання-складання, де немає чітко встановленої виробничо-технологічної послідовності виконання операцій. Лише деякі групи операцій мають чітку черговість, це дає змогу під час моделювання при певній кількості робочих зон, робітників та обладнання суттєво скоротити тривалість ТО.

Моделювання ТП ТО передбачає декілька етапів:

- змінна кількість робітників та незмінна кількість обладнання та постів;
- змінна кількість працівників та обладнання та незмінна кількість постів;
- моделювання при змінній кількості робітників, обладнання та постів.

Процес моделювання дав змогу визначити мінімально можливу тривалість ТП різних моделей.

Розроблена методика моделювання ТП ТО, евристичний алгоритм та програмне забезпечення її реалізації на ПК є універсальними та уможливають дослідження будь-яких ТП, що виконуються на стаціонарних постах.

Бібліографічний список

1. Барабаш О. В., Свинчук О. В., Му-сієнко А. П. Математичне моделювання та оптимізація процесів і систем. Частина 1 : навч.

посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 160 с.

2. Барабаш Р. І. Обґрунтування виробничої структури пунктів технічного обслуговування тракторів ХТЗ : дис...канд. техн. наук. Львів. 2021. 215 с.

3. Біліченко В. В., Кужель В. П. Моделювання технологічних процесів підприємств автомобільного транспорту : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2017. 163 с.

4. Кузьмінський Р. Д., Соколовський О. Р. Алгоритм проектування технологічних процесів, які виконуються на стаціонарних постах. *Сільськогосподарські машини*: зб. наук. статей. Луцьк, 2011. Вип. 21, т. 1. С. 228–235.

5. Кузьмінський Р., Кордоба В. Алгоритм визначення продуктивності та виробничої структури технологічних дільниць відновлення зношених деталей на етапі проектування. *Вісник Львівського національного аграрного університету: Агроінженерні дослідження*. 2011. № 15. С. 297–308.

6. Математичне моделювання систем і процесів : навч. посіб. / П.М. Павленко та ін. Київ : НАУ, 2017. 392 с.

7. Роговський І. Л. Методологія оцінювання технології технічного обслуговування сільськогосподарських машин *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК*. 2012. № 170 (2). С. 368–375.

8. Семкович А. Д., Кузьмінський Р. Д. Моделювання технологічних процесів ремонту машин. Перспективи розвитку механізації, електрифікації, автоматизації та технічного сервісу: тези доп. Міжнародної наук.-техн. конф.

- (Глеваха, 1-3 жов. 1996 р.). Глеваха, 1996. С. 15.
9. Семкович А. Д., Кузьмінський Р. Д. Узагальнений алгоритм моделювання ремонтно-технологічних процесів розбирання та складання. *Моделювання процесів та технологічного обладнання у сільському господарстві: матеріали доп. Міжнародної наук.-практ. конф. (17-19 серп. 1994 г.)*. Мелітополь: ТДАТА, 1994. Т. 4. С. 48–51.
10. Семкович О. Д., Кузьмінський Р. Д., Флис І. М. Методика моделювання на ЕОМ технологічного процесу поточного ремонту двигуна. *Підвищення організаційно-технологічного рівня ремонтно-відновних процесів в АПК регіону: зб. наук. праць*. Львів: Львів. с.-г. ін-т, 1990. С. 15–26.
11. Томашевський В. М. Моделювання систем. Київ : Видавнича група ВHV, 2005. 352 с.
12. Чухрай В. С. Чухрай Л. В. Методика впорядкування послідовності виконання операцій складання та розбирання машин. *MOTROL : Motoryzacja i energetyka rolnictwa*. Tom 13. Lublin. 2011. С. 70–80.
13. Attahiru S. Alfa. *Applied Discrete-Time Queues*. Springer New York, NY. 2016. 383 p.
14. Chan W. C. *An elementary introduction to queueing systems*. University of Calgary, Canada. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2014. 103 p.
15. Gautam N. *Analysis of queues: methods and applications*. Boca Raton. CRC Press, 2012. 802 p.
16. Gross D., Shortle J., Thompson J., Harris J. *Fundamentals of Queueing Theory*. Hoboken, New Jersey. A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2008. 528 p.
17. Grozev D., Milchev M., Georgiev I. Study the work of specialized car service as queue theory. *International Scientific Journal «Mathematical Modeling»*. 2020. Vol. 4, Issue 1. P. 31–34.
18. Sztrik J. *Basic Queueing Theory*. GlobeEdit, OmniScriptum GmbH, KG, Saarbrucken, Germany. 2016. 246 p.

Стаття надійшла 23.04.2024