

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 674:625.007

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.7

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ МАШИННИХ СИСТЕМ ЗМІШАНОЇ СТРУКТУРИ

Валюх О. А., Іванишин Т. В., Поберейко Б. П.
Національний лісотехнічний університет України

***Анотація.** У статті запропоновано побудовані аналітичні моделі й графічні залежності коефіцієнта використання робочого часу та коефіцієнта накладених втрат робочого часу верстатів автоматизованих ліній зі змішаною структурою агрегативання машин і стохастичною тривалістю технологічних операцій. Подано результати дослідження впливу числа технологічних дільниць і паралельно працюючих на них верстатів, параметра стабільності технологічної операції та ємності міжопераційних буферних пристроїв на коефіцієнти завантаження машин і накладені втрати їх робочого часу.*

***Ключові слова:** автоматизована лінія, аналітичні моделі, стохастична тривалість, буферний пристрій, параметр стабільності, коефіцієнт завантаження, накладені втрати.*

Вступ

Переважає більшість наявних методик аналітичного моделювання процесу функціонування автоматизованих ліній не враховують випадкового впливу збурювальних чинників на їх якісні показники роботи [1]. Як наслідок, аналіз властивостей та оцінювання ефективності таких машинних систем здійснюється наближено чи опосередковано, а синтезовані структури ліній не завжди відповідають вимогам раціональної експлуатації основного та допоміжного устаткування. Це призводить до появи значних втрат робочого часу й продуктивності машин та їх автоматизованих систем під час оброблення заготовок і виготовлення продукції [2]. У зв'язку з цим є потреба в удосконаленні наявних та розробленні нових методик моделювання й оцінювання кількісних і якісних показників ефективності автоматизованих ліній в умовах стохастичної невизначеності варіювання тривалості технологічних операцій на верстатах та оптимізації структур і параметрів автоматизованих машинних систем.

Аналіз публікацій

Високі вимоги, що висуваються до якості технологічного процесу в умовах різнотипного виробництва, визначають низку теоретичних і практичних завдань під час побудови та експлуатації автоматизованих ліній. Раціональне проектування таких машинних систем і окремих машин-автоматів є складним оптимізаційним завданням і потребує

знання закономірностей їх функціонування, які залежать від структури самих ліній і від зовнішніх умов їх експлуатації [1].

Якщо припустити, що число заготовок, яку видає перший верстат у лінії, є випадковою величиною, розподіленою за законом Пуасона, а час її оброблення на другому верстаті відповідає показниковому закону, то параметри функціонування такої двоверстатної системи можна розрахувати за математичною моделлю теорії масового обслуговування. Таку модель щодо лісооброблювальних ліній уперше створив і дослідив Д. Дудюк [1, 3]. Крім того, за допомогою імітаційного моделювання ним побудовано оптимізаційну модель двоверстатної лінії з різними характеристиками роботи обладнання, обґрунтовано параметри найпростіших варіантів автоматизованих ліній деревооброблення з будь-яким числом дільниць і визначено оптимальні ємності міжверстатних механізмів живлення заготовками.

Питанням якісного аналізу та підвищення продуктивності й ефективності функціонування автоматизованих ліній лісового комплексу присвячені численні наукові праці В. Максиміва, Л. Сороки та П. Пеха, які для розв'язання поставлених завдань застосовували різнотипні алгоритми імітаційного моделювання, прийнявши розподіл Ерланга ймовірностей тривалості операцій за основу математичної моделі процесів дослідження [1]. Створені імітаційні та синтезовані математичні моделі дали змогу оптимізувати

структури та параметри комбінованих варіантів однопоточкових ліній, ліній змішаної структури й ліній із фіксованим мінімальним значенням тривалості циклів верстатів та розробити інженерну методику розрахунку оптимальної місткості буферних пристроїв і визначення місць їх установа.

Незважаючи на всю сукупність розроблених методів аналізу продуктивності автоматизованих ліній лісового комплексу, синтезовані аналітичні залежності дають змогу розраховувати здебільшого двоверстатні системи з послідовним агрегуванням обладнання [3–5]. Для математичного моделювання коефіцієнтів використання ρ_i та накладання втрат робочого часу $K_{н.в.}$, фактичної продуктивності й питомих зведених витрат на одиницю виготовленої продукції машин і багатостаткових систем та оцінювання ефективності їх функціонування Д. Дудюком розроблено методику «еквівалентних» чи «віртуальних» пар машин [3].

Обов'язковою умовою ефективності виконаних експериментальних і теоретичних досліджень є забезпечення високої достовірності отриманих числових значень параметрів ліній і синтезованих математичних моделей, доведення результатів до мінімального обсягу вихідної інформації й надання максимально простої та наочної інтерпретації виконаних обчислень та інженерних висновків.

Мета та постановка завдання

Метою завдання є дослідження якісних показників функціонування автоматизованих ліній змішаної структури з гнучким агрегуванням машин і випадковою природою тривалості технологічних операцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити імітаційну модель, змоделювати роботу автоматизованої машинної системи в умовах стохастичної невизначеності варіювання часових інтервалів оброблення заготовок, побудувати аналітичні моделі та дослідити залежності показників ефективності функціонування машин автоматизованої лінії.

Моделювання та аналіз якісних показників функціонування автоматизованих ліній змішаного агрегування

Аналіз особливостей виробничих процесів лісової та деревообробної галузі показує [3], що найбільш складними за структурою та властивостями є автоматизовані системи

машин змішаного агрегування з гнучкими міжверстатними зв'язками (рис. 1).

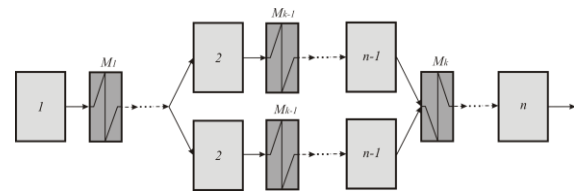


Рис. 1. Схема автоматизованої лінії комбінованої структури з гнучкими міжагрегатними зв'язками

Характерною особливістю таких ліній є те, що буферні пристрої між машинами, окрім накопичення заготовок, забезпечують їх передачу від будь-якого верстата попередньої дільниці до будь-якого верстата наступної дільниці. Зупинка роботи машини на технологічній дільниці не призводить до зупинки всієї лінії, оскільки процес оброблення заготовок продовжується на інших верстатах. Експлуатація таких автоматизованих ліній дає змогу більш повноцінно використовувати технологічне й транспортне обладнання та буферні накопичувачі предметів оброблення.

Але застосування розроблених методик теорії продуктивності автоматичних ліній та теорії структурного аналізу й синтезу машинних систем, що використовуються в машинобудуванні, для оцінювання ефективності функціонування ліній змішаного агрегування в лісопромисловому комплексі має обмежений характер через стохастичність часових інтервалів між проходженням заготовок та тривалістю часу їх оброблення.

Для досягнення поставленої мети побудовано імітаційну модель процесу функціонування автоматизованих ліній комбінованої структури, яка дає змогу досліджувати кількісні та якісні показники роботи ліній загалом та їх верстатів зокрема, залежно від кількості дільниць у структурі лінії F , числа машин на кожній дільниці a_i , ємності буферних пристроїв між фазами M , тривалості t та коефіцієнта стабільності операції $K(i, j)$ j -го агрегата на i -й дільниці (параметра Ерланга).

Окрім дослідження коефіцієнтів використання робочого часу $\rho(i, j)$ та накладених його втрат $K_{н.в.}$, за допомогою такої імітаційної моделі можна проводити структурно-параметричну оптимізацію автоматизованих ліній змішаної структури за критеріями продуктивності чи мінімуму питомих приведених витрат на оброблення заготовок.

Статистичне моделювання процесу функціонування автоматизованих машинних систем дало змогу отримати статистичні значення досліджуваних параметрів, що відповідають структурі лінії. Для побудови кореляційної залежності коефіцієнта накладених втрат робочого часу $K_{н.в.}$ від вищеперелічених чинників було реалізовано на імітаційній моделі кібернетичний експеримент, за результатами якого отримано рівняння регресії:

$$K_{н.в.} = 1 - e^A, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{де } A = & -1,911 - 0,28 \ln K - \ln(M+1)((0,305 + \\ & + 0,09 \ln(M+1) + 0,211 \ln K + 0,044 \ln F + \\ & + 0,044 \ln F - 0,117 \ln a)) + \ln F(1,426 - \\ & - 0,355 \ln F + 0,056 \ln a) - 0,533 \ln a. \end{aligned}$$

Як частковий випадок, отримано вираз для послідовної структури машинної системи з жорстким міжверстатним зв'язком ($a = 1$, $M = 0$):

$$K_{н.в.} = \exp(-1,911 - 0,28 \ln K + \ln F(1,426 - 0,355 \ln F)). \quad (2)$$

На основі класичних методів проведення кібернетичного експерименту отримано залежність коефіцієнта накладених втрат $K_{н.в.}$ від зміни кількості дільниць у лінії та числа верстатів на дільниці для величини параметра Ерланга $K=1$ і місткості міжопераційного накопичувача $M = 0$:

$$K_{н.в.} = 1 - \exp(-1,245 + 0,349 \ln F + (0,08 \ln F - 0,553) \ln a). \quad (3)$$

Отримані аналітичні моделі дали змогу побудувати й проаналізувати графічні залежності (рис. 2–5) коефіцієнта використання робочого часу ρ машин двофазних автоматизованих ліній змішаної структури з різними величинами міжопераційних запасів M предметів оброблення від числа паралельно працюючих верстатів a однакової продуктивності.

З рис. 2 випливає, що в разі жорсткого міжагрегатного зв'язку зі збільшенням числа паралельно працюючих верстатів значно підвищується коефіцієнт використання робочого часу машин і продуктивність лінії загалом.

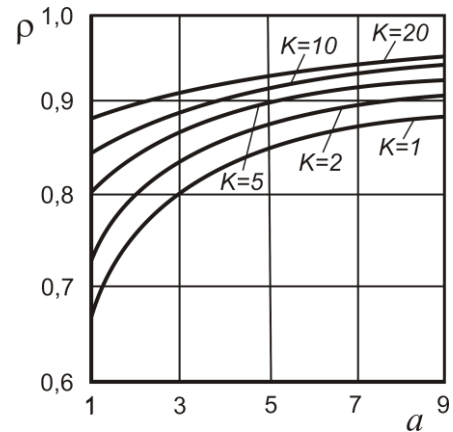


Рис. 2. Залежність коефіцієнта використання робочого часу ρ від числа a паралельно працюючих машин у лінії для $M = 0$

Так, для автоматизованої лінії з жорстким агрегуванням машин збільшення числа паралельно працюючих верстатів утрічі $1 \leq a \leq 3$ призводить до зростання коефіцієнта використання робочого часу на 11–15 % для простих потоків заготовок, коли $K = 1–2$, і на 4–7 % для ерлангових потоків предметів оброблення, якщо $K = 5–20$. Наступне збільшення числа паралельно працюючих верстатів $3 < a \leq 9$ дає приріст коефіцієнта використання робочого часу на 5–10 % для потоків з $K = 1–2$ і на 3,4–4 % для потоків з $K = 5–20$.

У випадку автоматизованих ліній з гнучкими міжверстатними зв'язками (рис. 3, 4) залежність коефіцієнта використання робочого часу від числа паралельно працюючих верстатів однакової продуктивності також має тенденцію до зростання, хоча меншою мірою, ніж у машинних системах із жорсткими міжагрегатними зв'язками.

Динаміка зростання коефіцієнта використання робочого часу є найвищою, коли верстатів в лінії характеризуються низьким значенням коефіцієнта стабільності технологічних операцій $K = 1…3$, а число паралельно працюючих машин на дільниці знаходиться в межах $a = 1…5$.

Наступне збільшення a мало впливає на величину коефіцієнта використання робочого часу верстатів (рис. 5).

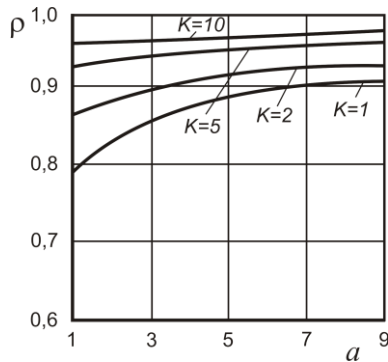


Рис. 3. Залежність коефіцієнта використання робочого часу ρ від числа a паралельно працюючих машин у лінії для $M = 2$

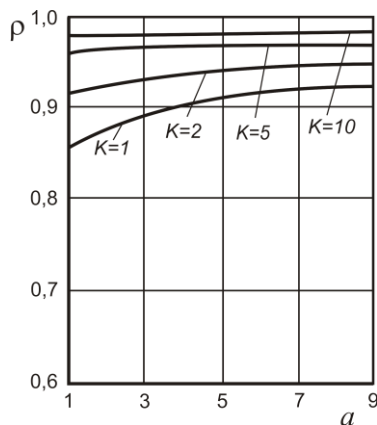


Рис. 4. Залежність коефіцієнта використання робочого часу ρ від числа a паралельно працюючих машин у лінії для $M = 4$

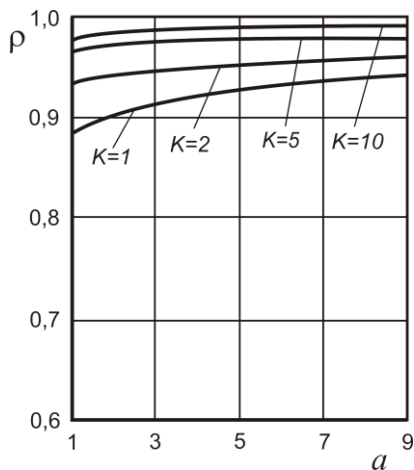


Рис. 5. Залежність коефіцієнта використання робочого часу ρ від числа a паралельно працюючих машин у лінії для $M = 6$

Результати залежності коефіцієнта використання робочого часу ρ у відсотках від числа паралельно працюючих верстатів a , місткості міжопераційних запасів M та коефіцієнта стабільності технологічних операцій K наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Співвідношення параметрів обладнання для лінії змішаної структури

Параметри лінії		Залежність зростання ρ (%) для різних величин M		
		$M = 0$	$M = 2$	$M = 6$
$a = 1-3$	$K = 1...3$	11-15	3,5-6	1-3
	$K = 5...20$	4-7	0,5-1	0,5
$a = 4-9$	$K = 1...3$	5-10	1-5	1-2
	$K = 5...20$	3,4-4	0,3-0,5	0,1-0,2

З метою забезпечення раціонального завантаження верстатів змішаної структури лінії, які працюють під дією збурювальних чинників, збільшення числа паралельних верстатів на ділянці до зменшення потрібної ємності буферних пристроїв (рис. 6). Так, для отримання коефіцієнта накладених втрат робочого часу величиною $K_{н.в.} = 0,1$ раціонально проектувати в структурі лінії гнучкі ділянки з такими співвідношеннями числа паралельно працюючих машин та ємності міжверстатних накопичувачів: $a = 2$ і $M = 6$; $a = 4$ і $M = 4$; $a = 8$ і $M = 2$.

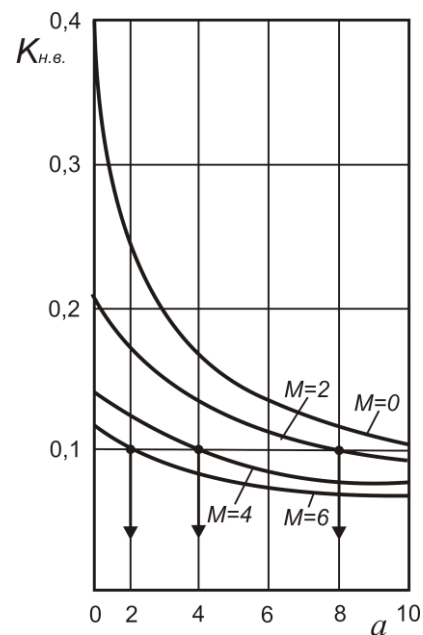


Рис. 6. Залежність коефіцієнта накладених втрат робочого часу $K_{н.в.}$ від числа a паралельно працюючих машин у лінії для $K = 1$ і різних величин місткості накопичувача M

Паралельне функціонування машин на окремих ділянках лінії сприяє зменшенню питомих втрат їх робочого часу, а загальна величина міжопераційного запасу предметів оброблення, необхідна для завантаження

лінії, у кілька разів нижча порівняно з автономною роботою верстатів у лінії.

Висновки

Виконані дослідження впливу числа дільниць і паралельно працюючих на них верстатів, коефіцієнта стабільності технологічних операцій та місткості міжопераційних накопичувачів на коефіцієнти завантаження робочого часу машин і накладені втрати робочого часу лінії дають змогу проєктувати раціональні структури автоматизованих систем машин зі змішаним агрегуванням верстатів для різних умов і типів виробництв.

Побудовані аналітичні й графічні залежності коефіцієнта використання робочого часу й коефіцієнта накладених його втрат і розроблена імітаційна модель автоматизованої лінії комбінованої структури дають змогу проводити кількісний і якісний аналіз функціонування основного й допоміжного обладнання та можуть бути використані для створення САПР автоматизованих машинних систем.

Література

1. Дудюк Д. Л., Максимів В. М., Сорока Л. Я. Моделювання і оптимізація технологічних потоків лісопереробки: монографія: у 2 ч. / під ред. Д. Л. Дудюка. Київ – Львів: ІСДО, 1995. 416 с. ISBN 5-7763-2425-4.1.
2. Дудюк Д. Л., Загвойська Л. Д. Оцінка й елімінування втрат робочого часу в автоматизованих системах деревообробного виробництва. Львів: Панорама, 2003. 140 с.
3. Елементи теорії автоматичних ліній / Дудюк Д. Л. та ін. Київ – Львів, 1998. 190 с. ISBN 5-7763-2642-7.
4. Іванишин Т. В. Математичне моделювання параметрів двоверстатної автоматизованої лінії з нестабільним ритмом роботи. *I Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасний стан науки»*; Міжнародний електронний науково-практичний журнал *WayScience*, 29–30 березня 2018 р. Дніпро, 2018. С. 40–45.
5. Іванишин Т. В. Формалізація показників ефективності функціонування автоматизованої двоверстатної системи машин з жорстким агрегуванням обладнання. *VII Міжнародна науково-технічна конференція з проблем вищої освіти і науки ТК-2022 «Прогресивні напрямки розвитку автоматичних технологічних комплексів»*, 28–30 травня 2022 р.: зб. наук. матеріалів. Луцьк, 2022. С. 19–20.
6. Longo Claudio Santo, Fantuzzi Cesare. Simulation and optimization of industrial production lines. AUTOMATISIERUNGSTECHNIK, 66:4, pp. 320–330. ISSN 0178-2312.
7. Luo Silin, Cen Songqing. Simulation and optimization of a factory automation production line based on Plant Simulation. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1820 012172. Doi:10.1088/1742-6596/1820/1/012172.
8. Leiber, D., Eickholt, D., Vuong, Anh-Tu, Reinhart, G. (2022) Simulation-based layout optimization formulti-station assembly lines.

Journal of Intelligent Manufacturing, 33, pp. 537–554. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01853-5>.

9. Krenczyk, D., Paprocka, I. (2023) Integration of Discrete Simulation, Prediction, and Optimization Methods for a Production Line Digital Twin Design. *Materials*, 16, 2339. <https://doi.org/10.3390/ma16062339>.

Валух Ольга Аркадіївна, канд. техн. наук, доц. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний лісотехнічний університет України (м. Львів), valyukh@ukr.net, тел. +38 067-792-32-83.

Іванишин Тарас Володимирович, канд. техн. наук, доц. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний лісотехнічний університет України (м. Львів), itarv@ukr.net, тел. +38 096-958-67-72.

Поберейко Богдан Петрович, д-р техн. наук, проф. каф. автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Національний лісотехнічний університет України (м. Львів), pobereykobp@ukr.net, тел. +38 096-958-67-72.

Simulation and analysis of the qualitative indicators of functioning of automated mixed structure machine systems

Abstract Problem. Today there is a need to improve existing and develop new methods of simulation and analysis of quantitative and qualitative indicators of the efficiency of automated lines in conditions of stochastic uncertainty of varying duration of technological processes on machines and optimizing the structure and parameters of automated machine systems. **Goal.** The goal of the task is to study qualitative indicators of the functioning of automated mixed structure lines with flexible aggregation of machines and random nature of the duration of technological process. **Methodology.** A simulation model was developed, the operation of the automated machine system was simulated in the conditions of stochastic uncertainty of variation in the time

intervals of workpiece processing, statistical data was obtained for the synthesis of mathematical relation of the main indicators of the functioning of the main and accessory equipment. **Results.** The results of the study of the influence of the number of technological sites and machines working in parallel on them, the stability characteristic of the technological operation and the capacity of interoperation buffer devices on the load factors of the machines and the imposed losses of their working time are presented. **Originality.** The research was carried out taking into account the random influence of disturbing factors on quality performance indicators of automated lines, and its result makes it possible to reduce the loss of working time and productivity of machine systems during the processing of workpieces and manufacture of products. **Practical value.** The generated analytical models and obtained research results can be used during the quantitative and qualitative analysis of functioning of automated machine systems with mixed aggregation of machines, optimization of their structures and parameters, and design of new automated lines.

Key words: automated line, analytical models, stochastic uncertainty, buffer device, stability characteristic, load factor, imposed losses.

Valyukh Olga Arkadiivna, PhD, Docent of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Ukrainian National Forestry University (Lviv), valyukh@ukr.net, tel. +38 067-792-32-83.

Ivanyshyn Taras Volodymyrovych, PhD, Docent of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Ukrainian National Forestry University (Lviv), itarv@ukr.net, tel. +38 096-958-67-72.

Pobereyko Bohdan Petrovych, Doctor of Science, Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies, Ukrainian National Forestry University (Lviv), pobereykobp@ukr.net, tel. +38 096-958-67-72.