

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОБОЧОГО ЧАСУ В АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ ДЕРЕВООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розроблена методика оцінювання ефективності робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Такий підхід використовується для аналізування і компонування автоматизованих ліній. Проведені дослідження стабільності технологічних операцій деревообробки та їх вплив на ефективність функціонування автоматизованих ліній. Встановлено, що причиною малої ефективності роботи автоматизованих ліній на підприємствах деревообробної галузі є малі значення параметрів стабільності технологічних операцій, а також накладні втрати робочого часу обладнання. Технологічні процеси обробки деревини піддаються значному впливу стохастичних дій, це розмірно-якісні характеристики сировини і матеріалів, параметри та стан технологічного обладнання, організація виробництва, зовнішні дії. Запропонована методика дозволяє формалізувати виробничий процес за допомогою теорії масового обслуговування. Застосовується імітаційне моделювання для дослідження компонування автоматизованих ліній і підвищення ефективності їх функціонування. Важливим завданням є оцінювання втрат робочого часу обладнання із високою точністю. Це забезпечить високу продуктивність виробництва. Значення втрат робочого часу залежить від кількості послідовно працюючих верстатів у лінії. Встановлено, що автоматизовані лінії з високою стабільністю функціонування обладнання та високими коефіцієнтами використання робочого часу мають значно вищу ефективність і продуктивність виробництва. Ефективність автоматизованих ліній із послідовним розміщенням верстатів нижча, внаслідок накладних втрат робочого часу роботи верстатів, які виникають у виробничому процесі. Здійснено оцінювання впливу на ефективність виробництва усіх складових втрат робочого часу обладнання з метою їх зменшення і підвищення продуктивності роботи автоматизованих ліній. Запропоновано метод обчислення, що передбачає застосування коректувального коефіцієнта для розрахунку автоматизованих ліній. Значення коефіцієнта залежить від кількості верстатів у технологічному потоці. Запропонована методика дає можливість точніше розраховувати реальні процеси функціонування ліній деревообробки.

Ключові слова: автоматизовані лінії деревообробного виробництва; деревообробне обладнання та верстати; компонування технологічних ліній; параметр стабільності технологічних операцій; ефективність автоматизованих ліній.

Вступ. Вплив стабільності технологічних операцій на ефективність функціонування автоматизованих виробничих систем деревообробного виробництва є важливим завданням дослідників технологічних процесів.

Постановка завдання даного дослідження полягає у тому, що важливо з метою підвищення ефективності автоматизованих ліній деревообробки здійснити аналіз втрат робочого часу обладнання. Важливо встановити причини і можливі шляхи підвищення продуктивності автоматизованих ліній. Подібні завдання намагалися вирішувати англійські і американські науковці Д. Вільямс [49], Б. Бадімен [2], Б. Тан, С. Гершвін [1], М. Стріт [42]. Їх науковці праці здебільшого на-

¹ Оріховський Роман Ярославович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: +38-067-278-13-68. E-mail: romanorix9@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4136-4058>

² Гайда Сергій Володимирович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри технологій меблів та виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-238-45-04, +38-067-791-25-22. E-mail: serhiy.hayda@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7468-5661> ResearcherID: ABB-1636-2021 Scopus/authorID=57221587964

дають значення вивченню технологічних процесів машинобудування. Дослідження автоматизованих ліній деревообробної галузі та показників функціонування виробничих систем проводили дослідники тривалий час [6, 7, 12, 15, 19, 22, 24, 27, 32, 33, 35, 37, 44, 45, 46]. Пропонувалися різні підходи підвищення продуктивності автоматизованих ліній, найчастіше, імітаційне моделювання роботи автоматизованої лінії. Наші дослідження присвячені дослідженню автоматизованих ліній деревообробного виробництва, які мають свої особливості. Дослідження автоматизованих ліній деревообробки з метою підвищення ефективності і продуктивності є актуальними сьогодні. Попередніх дослідження [3] не враховували усі складові втрати робочого часу верстатів. Важливо зменшувати втрати робочого часу обладнання і забезпечувати високу продуктивність роботи устаткування. Аналіз великої кількості наукових досліджень [1, 2, 3, 4, 5, 49] дозволив встановити, що однією із причин низької ефективності роботи автоматизованих систем є малі значення параметрів стабільності технологічних операцій. Такі причини є характерними для процесів оброблення деревини і деревинних матеріалів, перероблення вживаної деревини [8, 13, 21, 29, 31] з отриманням якісних конструкційних щитових матеріалів [11, 13, 16, 18, 22, 23, 34] з прогнозованими властивостями [9, 10, 14, 17, 26, 28, 30, 36].

Об'єкт дослідження – автоматизовані лінії деревообробного виробництва.

Предмет дослідження – методи розрахунку втрат робочого часу в автоматизованих виробничих системах, ефективність функціонування.

Мета роботи – оцінювання ефективності використання робочого часу обладнання, зменшення втрат робочого часу, забезпечення високої продуктивності роботи деревообробних автоматизованих ліній. Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження: здійснити аналіз наукових досліджень за даною тематикою; проаналізувати результати досліджень.

Аналіз наукових досліджень та наукових праць. Сучасні методи аналізування і оцінювання впливу значень параметра стабільності на ефективність автоматизованих ліній є недосконалими. Наприклад, використовується одне усереднене значення параметра стабільності для усіх верстатів автоматизованої лінії [5]. Методи визначення усереднених показників стабільності [3] розглядаються у залежності від компоновки технологічного обладнання. Розглядаються різні варіанти: послідовне, паралельне або змішане компонування верстатів залежно від технології обробки [49]. Для розрахунку коефіцієнтів використання робочого часу обладнання у двоверстатних лініях із жорсткими зв'язками виконувалося імітаційне моделювання сформульовані основні висновки та рекомендації для підвищення продуктивності ліній [38]. У наукових працях [38, 41] аналізується математичний апарат для моделювання процесу функціонування двоверстатної автоматизованої лінії з гнучким міжверстатним зв'язком. Обчислені коефіцієнти використання робочого часу і продуктивності ліній. Науковці запропонували застосування [39] впорядкування послідовності розташування верстатів різної продуктивності для структур триверстатних автоматизованих ліній зі стохастичною тривалістю оброблення заготовок. Встановлено ступінь впливу параметра Ерланга технологічних операцій на продуктивність виробничої системи.

Розроблені рекомендації компонування автоматизованих ліній з урахуванням раціональної послідовності стабільностей верстатів. Науковці намагаються вирі-

шити проблему формалізації показників ефективності функціонування автоматизованих ліній з жорстким компонуванням обладнання [40]. Проведені дослідження формування функціональних структур автоматизованих ліній із штучним інтелектом [4]. Проаналізовані функції та структури гнучких автоматизованих виробничих систем. Підтверджені принципи побудови систем автоматизованого контролю і керування технологічним процесом та гнучким автоматизованим виробництвом [14]. Проблема моделювання процесів функціонування автоматизованих ліній займаються науковці Массачусетського технологічного інституту (англ. *Massachusetts Institute of Technology*) у США [2, 42].

Результати досліджень. Параметр стабільності для ліній, які мають послідовне поєднання верстатів з **неоднаковими** циклами технологічних операцій t_i і параметрами стабільності обчислюють за формулою [3]:

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{t_{b,i}^2}{K_i}}, \quad (1)$$

де: $t_{b,i} = t_i/t$ – відносна тривалість циклу i -ої технологічної операції; t – тривалість технологічної операції; n – кількість технологічних операцій у технологічній лінії; K_i – параметр стабільності перебігу i -ої технологічної операції.

Параметр стабільності технологічної операції деревообробного виробництва обчислюють за формулою:

$$K_i = \frac{t_i^2}{D_i}, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де D_i – дисперсія тривалості i -ої технологічної операції.

Параметр стабільності для усіх n верстатів за формулою $K_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_{ei}^2}{K_i}$. (3)

Для технологічних ліній послідовної структури із **однаковими** за значеннями тривалостями оброблення t_e на усіх технологічних операціях, параметр стабільності обчислюють за формулою

$$K_e = \frac{t_e^2}{n} \sum_{i=1}^n K_i^{-1} \quad (4)$$

Оскільки $t_e = 1/n$, то отримаємо $K_e = n / \sum_{i=1}^n K_i^{-1}$. (5)

В лініях із **послідовною** структурою компонування устаткування з **однаковою** продуктивністю, але різними параметрами стабільності операцій K_i , параметр стабільності K_e^{-1} буде розраховуватися

$$K_e^{-1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i^{-1}. \quad (6)$$

У технологічній лінії із послідовним розміщенням верстатів з **різними параметрами стабільності** технологічних операцій використовують усереднені параметри. У разі великої переваги в лінії устаткування, для якого характерна висока стабільність технологічних операцій, то усереднений параметр стабільності дорівнює високим параметрам стабільності [3]. Для лінії, що складається із двох верстатів приблизно однакової продуктивності, усереднений параметр стабільності технологічних операцій обчислюють за формулою

$$K_e = \frac{2}{K_1^{-1} + K_2^{-1}}. \quad (7)$$

Розрахунок параметра стабільності лінії значно залежить від кількості верстатів у лінії та стабільності. У технологічній лінії з трьох верстатів параметр стабільності обчислюють за формулою

$$K_e = \frac{3}{K_1^{-1} + K_2^{-1} + K_3^{-1}}. \quad (8)$$

Такий підхід розв'язує завдання аналізу і синтезу автоматизованих ліній з різними параметрами стабільності функціонування устаткування.

Під час функціонування автоматизованої лінії, яка складається із послідовно розміщених верстатів, виникають накладні втрати робочого часу, які зменшують ефективність використання усієї лінії. Значне накладання втрат робочого часу верстатів особливо є характерним у технологічних лініях деревообробного виробництва. У деревообробці додаткові втрати робочого часу верстатів становлять половину втрат робочого часу технологічного процесу, зокрема такі:

- у технологічному процесі використовуються різні види оброблення деревини та заготівок; технологічні лінії деревообробки мають велику кількість технологічних операцій;
- під час деревообробного виробництва обробляється велика кількість заготівок із різними параметрами і породами деревини, різних сортів та розмірів.

Важливо оцінити складові втрати робочого часу автоматизованої лінії із високою точністю для забезпечення високої продуктивності виробництва. Сучасні методи оцінювання значень накладання втрат робочого часу застосовуються для технологічних ліній з верстатами, що характеризуються однаковими параметрами [3, 5]. У технологічних лініях з двох послідовних верстатів, що мають різні номінальні продуктивності, використовують аналітичні залежності для обчислення накладених втрат робочого часу [3]. Для лінії, яка складається з трьох або більше послідовних верстатів із різною продуктивністю роботи застосовується наближене оцінювання таких втрат робочого часу. Використовують відповідні обчислення для двох верстатів, що поряд розташовані у лінії [3, 5].

Перший етап обчислення дозволяє знайти накладні втрати для двох перших верстатів. Обчислене значення продуктивності ділянки з двох верстатів використовують у наступному кроці розрахунків. Обидва верстати розглядають і математичному моделюванні як одна умовна одиниця. Вона взаємодіє з наступним верстатом. Здійснюються обчислення відповідних параметрів для нової умовної ділянки. Обчислення виконують до закінчення процесу. Разом із обчисленнями здійснюють імітаційне моделювання автоматизованої лінії на комп'ютері [3, 5]. Величина втрат робочого часу залежить від кількості верстатів, які працюють у лінії та розміщуються послідовно. В лініях, що мають верстати і технологічне обладнання із високою стабільністю, коефіцієнт накладання втрат робочого часу лінії обчислюють за такою формулою [3, 5]:
$$H_c = 1 + \frac{1}{(a-1) \cdot B}, \quad (9)$$

де: a – кількість верстатів у технологічному потоці; B – втрати робочого часу на окремому верстаті.

Втрати робочого часу автоматизованої лінії обчислюють згідно кількості верстатів у технологічній лінії і втрат робочого часу на окремих верстатах B . Розрахункові формули не ураховують стабільність технологічної операції. Гнучкі виробничі зв'язки між окремими верстатами також не враховані. У виробничих системах кількість верстатів, які мають однакові характеристики і з'єднані без накопичувальних пристроїв з індивідуальним ритмом роботи та мінімальною стабільністю тривалості технологічної операції параметр Ерланга буде таким $K=1$. Коефіцієнт додаткових втрат робочого часу цієї системи обчислюється за формулою [3]:
$$H_{ci} = 0,6333 - 0,6 / a, \quad 2 \leq a \leq 50. \quad (10)$$

Велика кількість дослідів на імітаційних комп'ютерних моделях і значна кількість варіантів компонування автоматизованих ліній підтверджують точність

розрахунків за формулою (10) у діапазоні $2 \leq a \leq 50$. У технологічних лініях, які використовують єдиний ритм роботи наступні технологічні операції розпочинаються одночасно. Тільки після закінчення попередніх операцій на усіх верстатах можна розпочати оброблення наступної заготовки. Втрати робочого часу у таких технологічних лініях є дуже великими.

Вони обчислюють за формулою:

$$H_{cl} = 1 - \left(\frac{a}{\mu} \right)^{-1}. \quad (11)$$

Аналітичні моделі наближено оцінюють роботу реальних систем виробництва. З теорії масового обслуговування [2] для простої моделі виробничої системи із двох послідовно розміщених верстатів і продуктивністю $\square_1$ і $\square_2$ коефіцієнт використання робочого часу першого і другого верстатів обчислюють за допомогою

формул:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1 &= \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu^3} = \frac{1 + \mu}{1 + \mu + \mu^2} \\ \rho_2 &= \mu \cdot \rho_1, \quad \mu = \mu_1 / \mu_2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Обчислюємо коефіцієнти накладання втрат робочого часу для 1-го верстата у технологічній лінії за формулою $H_1 = 1 - \rho_1 = 1 - \frac{1 + \mu}{1 + \mu + \mu^2} = \frac{\mu^2}{1 + \mu + \mu^2}$. (13)

Для другого верстата у технологічній лінії виконуємо обчислення коефіцієнта накладання втрат робочого часу за такою формулою

$$H_2 = 1 - \rho_2 = 1 - \mu \cdot \rho_1 = 1 - \frac{\mu + \mu^2}{1 + \mu + \mu^2} = \frac{1}{1 + \mu + \mu^2}. \quad (14)$$

Наступне відношення описує коефіцієнти накладання втрат робочого часу двох верстатів технологічної лінії $H_1/H_2 = \mu^2 = \mu_1^2/\mu_2^2$. (15)

Між коефіцієнтами накладання втрат робочого часу існує зв'язок

$$H_1 = \mu^2 \cdot H_2. \quad (16)$$

За допомогою отриманих залежностей аналізується виробничий процес і оцінюється взаємодія двох верстатів у лінії. Для багатofазних виробничих систем теж можна використовувати такий метод. У цьому методі використовують послідовний попарний верстатний аналіз втрат робочого часу устаткування. Такий метод при обчисленнях дає дещо завищені результати із запасом. Ступінь завищення зростає із збільшенням кількості верстатів у технологічній лінії.

Попарний верстатний розрахунок автоматизованих ліній не ураховує те, що у реальних процесах відбуваються одночасні затримки заготовок на деревообробних верстатах і втрати робочого часу не додаються. Значення завищення додаткових втрат робочого часу збільшується із збільшенням кількості верстатів у технологічному потоці. Для здійснювання моделювання багатofазних технологічних ліній використовуються моделі парної взаємодії із різним накладанням втрат робочого часу. У розрахункових формулах вводять коректувальний коефіцієнт, який може змінюватися, залежно від кількості верстатів в автоматизованій лінії. Цей метод буде відповідати дійсному показникові накладання втрат робочого часу у технологічній лінії.

Забезпечується необхідна точність покрокового розрахунку втрат робочого часу за допомогою показника степеня n у формулах (17-18) залежно від кількості верстатів у автоматизованій лінії. Отримаємо такі формули:

$$\left. \begin{aligned} H_1 = 1 - \rho_1 = 1 - \frac{1 - \mu^n}{1 - \mu^{n+1}} &= \mu^n \frac{1 - \mu}{1 - \mu^{n+1}} \\ H_2 = 1 - \rho_2 = 1 - \mu \frac{1 - \mu^n}{1 - \mu^{n+1}} &= \frac{1 - \mu}{1 - \mu^{n+1}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Залежності мають задовільні результати. Використовується залежність між показником степеня n і кількістю верстатів у лінії $n = \sqrt[3]{4a}$, $2 \leq a \leq 30$ (18)

Якщо кількість верстатів у технологічній лінії змінюється від 2 одиниць до 30, тоді показник степеня n збільшується до 4,9 (рис. 1).

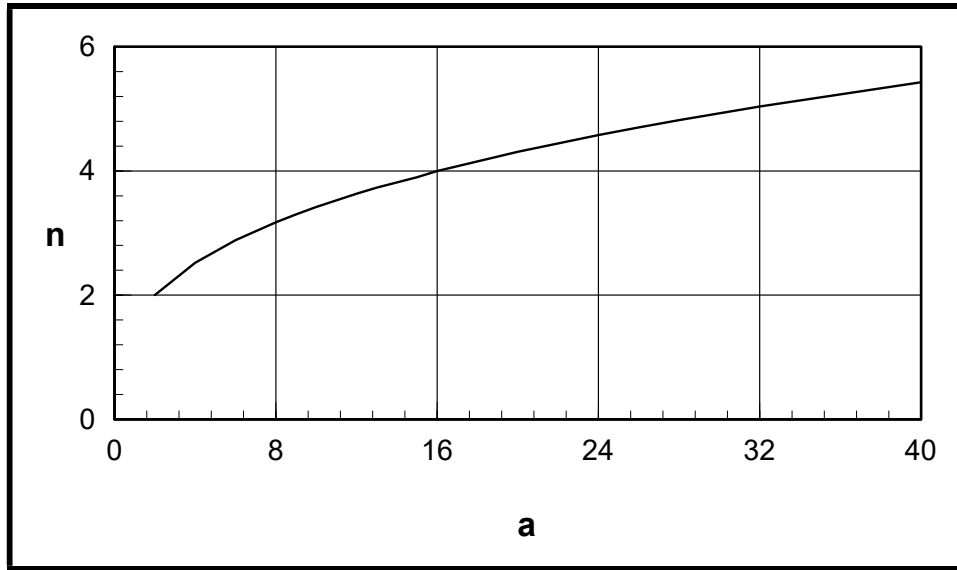


Рис. 1. Залежність показника n від кількості верстатів a в лінії

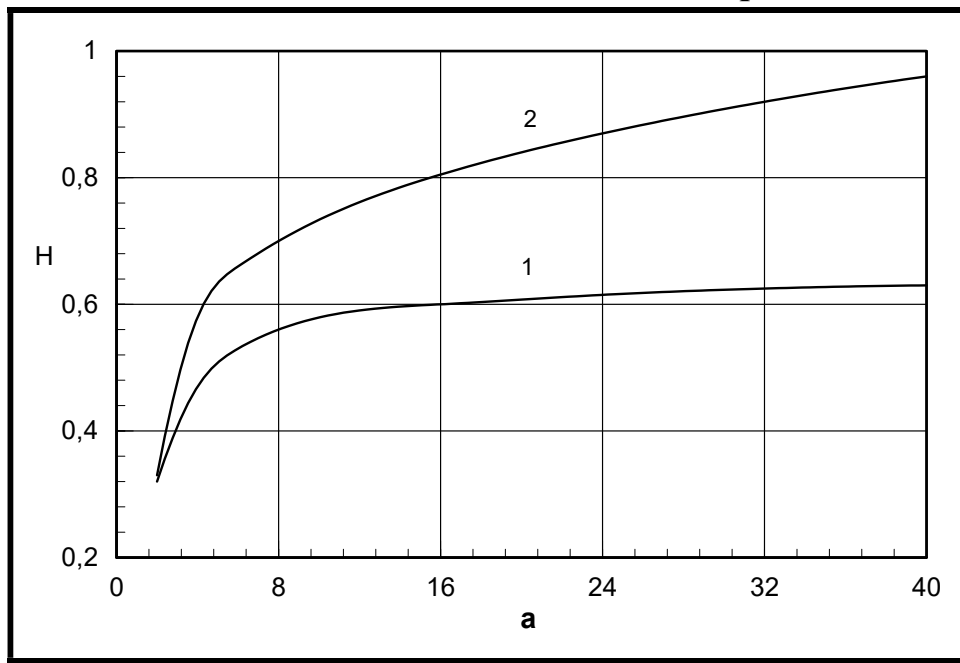


Рис. 2. Фактичне (1) та обчислене (2) значення коефіцієнта втрат робочого часу залежно від кількості верстатів a в автоматизованій лінії

Методика розрахунку за методом послідовного аналізу пар верстатів в автоматизованій лінії дає змогу отримувати завищені результати обчислень із запасом (рис. 2). Накладні втрати робочого часу верстатів, обчислюють за допомогою формул (17) з використанням показника степеня n (18). Дійсні значення коефіціє-

нта накладених втрат робочого часу верстатів обчислюють за допомогою формули (19)

$$H_T = 1 - \left(\frac{2}{3}\right)^{\log_2 a}. \quad (19)$$

В однакових умовах функціонування автоматизованих ліній, для обчислення накладних втрат робочого часу верстатів формули (10) та (20) дають можливість отримувати наближені розрахункові значення.

$$H_n = 1 - \left(\frac{n}{n+1}\right)^{\log_2 a} = 1 - (1 + n^{-1})^{-\log_2 a} = 1 + \left[1 + (4a)^{-1/3}\right]^{-\log_2 a}, \quad 2 \leq a \leq 30. \quad (20)$$

Обговорення та аналіз результатів. Вивчення наукових праць з даної тематики, показує, що дослідники використовують різні підходи до вирішення цієї проблеми. Наприклад, науковці [47] розглядають безперервну виробничу систему з двох верстатів із буфером кінцевої ємності. Верстати піддаються відмовам, ремонтам та профілактичному технічному обслуговуванню залежно від стану. Верстати можуть переходити у кілька станів, які характеризуються різними параметрами продуктивності, починаючи від ідеальної роботи до повного вимкнення. Пропонуємо детальніше розглядати функціонування виробничої системи з урахуванням стохастичних впливів на виробничий процес. Це забезпечить точніші розрахунки. У науковій роботі [42] виробнича лінія має декілька робочих верстатів, з'єднаних між собою послідовно. Щоб забезпечити високу продуктивність, буфери розподіляються між суміжними верстатами.

Ця виробнича система називається системою серійного виробництва з проміжними буферами. Верстат у виробничій системі не може виконувати заплановані завдання, якщо вихідний буфер порожній або наступний буфер заповнений. Перерви у роботі забезпечують додаткові можливості для обслуговування верстатів. Такий підхід до імітаційного моделювання також використовується у наших моделях. Застосування нашого методу дозволяє компенсувати втрати робочого часу верстатів. У науковій роботі [48] розглядається інноваційна стратегія технічного обслуговування виробничої системи. Технологічна лінія містить пошкоджений верстат і має буферний запас. Із збільшенням кількості технологічних операцій стан верстата погіршується. Зростає виробничий брак. Стохастичний процес підвищує кількість дефектів і відмов. Для відновлення верстата приймають рішення. Пропонують застосовувати гібридний метод оптимізації порядку обслуговування виробничої системи. Гібридний метод ураховує інтеграцію модифікованого методу прийняття рішень людиною. Застосовується імітаційне моделювання, метод Монте-Карло та застосовуються генетичні алгоритми (GA). Людина приймає рішення, вибирає ефективні заходи з технічного обслуговування, враховує відповідну інформацію про виробничу систему. Далі на основі математичної моделі, використовуючи імітаційне моделювання Монте-Карло та GA, коректують параметри, для оптимізації та мінімізації витрат.

У науковій роботі [47] розглядається виробнича система безперервного потоку заготовок з двома верстатами, які підлягають профілактичному технічному обслуговуванню залежно від стану та розділені проміжним буфером кінцевої ємності. Запропонована методика розрахунку дозволяє оцінювати вплив на ефективність виробництва усіх складових втрат робочого часу устаткування з метою їх зменшення, для забезпечення високої продуктивності роботи автоматизованих ліній деревообробного виробництва. Методика обчислення ураховує коректуваль-

ний коефіцієнт для розрахунку автоматизованих ліній залежно від кількості верстатів у технологічному потоці та враховує залежність ступеня накладених втрат робочого часу від кількості верстатів. Методика дає можливість з високою точністю обчислювати реальні процеси функціонування автоматизованих ліній.

Результатами проведеної роботи дозволяють сформулювати наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження. *Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – вперше розроблена методика обчислення накладних втрат робочого часу верстатів автоматизованих ліній деревообробки. Детально здійснено аналіз втрат робочого часу обладнання з метою їх компенсації та підвищення продуктивності. *Практична значущість результатів дослідження* – результати наукового дослідження доцільно застосувати для визначення параметрів роботи автоматизованих ліній деревообробної галузі із урахуванням накладних втрат робочого часу функціонування верстатів.

Виконані дослідження встановлюють вплив втрат робочого часу та стабільність технологічних операцій деревообробного виробництва на ефективність функціонування автоматизованих виробничих систем. Вони дають змогу використовувати нові методи для розрахунку параметрів виробничих систем.

Проведений аналіз дає змогу зробити такі основні **висновки**:

1. Ефективність автоматизованих ліній з послідовним розташуванням верстатів знижується через накладні втрати робочого часу. Запропонована методика розрахунку накладних втрат робочого часу верстатів, дає змогу здійснювати обчислення із запасом до 25 %.

2. Запропоновано використовувати коректувальний коефіцієнт для обчислень, залежно від кількості верстатів в автоматизованій лінії. Новий метод обчислень урахує залежність ступеня накладних втрат робочого часу від кількості верстатів у технологічній лінії. Цей метод є точнішим. Процеси функціонування автоматизованих ліній відтворюються реально. Методика дає достовірні результати обчислень. Методика дозволяє аналізувати якість функціонування автоматизованих ліній деревообробного виробництва.

References

1. **B. Tan and S.B. Gershwin**, (2001). On Production and Subcontracting Strategies for Manufacturers with Limited Capacity and Backlog-Dependent Demand,"Operations Research Center, Massachusetts Institute of Technology, Working Paper, OR354-01.
2. **Benny S. Budiman**. (2004). Optimal Capacity Adjustment for Supply Chain Control. Massachusetts Institute of Technology, 106 p.
3. **Dudyuk D.L., Maksymiv V.M., Soroka L.Ya., Orikhovsky R.Ya. et al.** (1996). Imitatsiyne modelyuvannya hnuchkykh avtomatyzovanykh liniy u lisovyrobnychomu kompleksi [Simulation modeling of flexible automated lines in the forestry complex]. Monograph. – Kyiv. – 140 p., (in Ukrainian).
4. **Dudyuk D.L., Mazepa S.S., Mysyk M.M.** (2008). *Гнучке автоматизоване виробництво і роботизовані комплекси* [Flexible automated production and robotic complexes]: Training manual. – Lviv: Magnolia, 278 p. (in Ukrainian).
5. **Dudyuk D.L., Zagvoyska I.D., Maksymiv V.M., Soroka L.Ya.** (1992). *Elementy teoriiy avtomatychnykh liniy* [Elements of the theory of automatic lines]. Textbook. – Kyiv. – 192 p., (in Ukrainian).
6. **Gayda S.V.** (1998). Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробленні: Основи робототехніки / *Hnuchki avtomatyzovani vyrobnytstva ta robototekhnika v derevoobroblenni* [Flexible manufacturing system and robots technology in the Woodworking. Vol.2: Fundamentals of robots technology]. Lviv: UNFU, 145 p
7. **Gayda S.V.** (2007). Дослідження концентрації операцій у сучасному меблевому виробництві / *Doslidzhennya kontsentratsiyi operatsiy u suchasnomu meblevomu vyrobnytstvi* [Research of concentration of operations in modern furniture Production]. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 33:73-79 (in Ukrainian).

8. **Gayda S.V.** (2013). Розроблення технології виробництва паливних гранул на основі енергетичного потенціалу вживаної деревини [Development of technology for the production of fuel pellets based on the energy potential of used wood]. *Scientific Bulletin of UNFU* 23.14:83-93. (in Ukrainian).
9. **Gayda S.V.** (2014). *Teoreticheskoye obosnovaniye podkhoda po prognozirovaniyu prochnosti drevesnostruzhechnykh plit iz vtorichno ispol'zuyemoy drevesiny* [The theoretical rationale for the approach on the prediction the strength of particleboard from recycled wood]. *Actual problems of forest complex* 38:212-216 (in Russian).
10. **Gayda S.V.** (2015). Modeling properties of blockboards made of post-consumer wood on the basis of the finite element method. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 41, 39-49. <https://doi.org/10.36930/42154106>
11. **Gayda S.V.** (2016). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood [Дослідження фізико-механічних характеристик фасадних столярних плит із вживаної деревини]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 42: 33-50.
12. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом / *Tekhnolohichni pidkhody do poverkhnevoho ochyshchennya vzhivanoyi derevyiny holkofrezernym instrumentom* [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11(in Ukrainian).
13. **Gayda S.V.** (2017). A technology and properties of furniture board (FB) made of post-consumer wood (PCW). *Actual problems of forest complex* 48:34-38 (in Russian).
14. **Gayda S.V.** (2017). The complex studies on the change of elastic properties of post-consumer fir wood with age. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 43:58-72 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42174308>
15. **Gayda S.V.** (2017). Using fuzzy expert systems for decision support in the process of post-consumer wood sorting. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 43:5-20 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42174301>
16. **Gayda S.V.** (2018). A investigation and analysis of characteristics of solid furniture boards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:15-25 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184402>.
17. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
18. **Gayda S.V.** (2018). Технологія МДФ-фасадів / *Tekhnolohiyi MDF-Fasadiv* [MDF Facade Technologies]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:70-83 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184410>
19. **Gayda S.V.** (2019). Scientific and technical basis of the use of used wood in woodworking: thesis of the Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.23. – Lviv: UNFU. – 465 (in Ukrainian).
20. **Gayda S.V.** (2020). Analysis of structures and technologies of manufacture of modern furniture facades. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 46, 54-64. <https://doi.org/10.36930/42204606> (in Ukrainian).
21. **Gayda S.V.** (2023). Determination of the circularity indicator in the forest sector according to the principles of the circular economy . *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 99-114, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234908>
22. **Gayda S.V.** (2023). State and analysis of the dynamics indicators of the production volume of the woodworking and furniture industry. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 4-19 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234901>
23. **Gayda S.V.** (2013). Resource-saving technologies of recycling of post-consumer wood]. *Scientific Bulletin of NULES of Ukraine: Technology and Energy of agroindustrial complex* 185(2):271-280, (in Ukrainian).
24. **Gayda S.V., Bilyy Ya.M.** (2019). Дослідження технологічних процесів виготовлення ліжок двоспальних різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnolohichnykh protsesiv vyhotovlennya lizhok dvospal'nykh riznykh konstruktsiy* [A investigation of technological processes of making beds of double different designs]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 45:21-31 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194504>
25. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2013). Технология очистки вторично используемой древесины иглофрезерными станками [The technology of cleaning recycled wood with needle milling machines] // *Actual problems and prospects of the development of LPK: materials II NTK.*, September 9-11, 2013 - Kostroma. - P. 36-39. (in Russian).

26. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2018). Shape stability as a quality criterion for PCW-made blockboards. *Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine* 17:185-192 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.15421/411834>
27. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). Determining the regime parameters for the surface cleaning of post-consumer wood by a needle milling tool. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 [1 [107]], 89–97. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.212484>.
28. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2020). The investigation of properties of blockboards made of post-consumer wood. *Poznan : Drewno*, 63 [206], 77-102. doi: <https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.352.10>.
29. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). Властивості вживаної деревини як визначальний чинник якості меблевих виробів / *Vlastyvosti vzhyyanoyi derevyyny yak vyznachal'nyy chynnyk yakosti meblevykh vyrobiv* [Properties of used wood as a determining factor in the quality of furniture products]. *Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine* 23:152-162, (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/412135>
30. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2023). Study of Physical and Mechanical Properties of Post-Consumer Wood of Different Age. *Drewno. Prace naukowe. Doniesienia. Komunikaty* 66 (212). 00010. <https://doi.org/10.53502/wood-177453>.
31. **Gayda S.V., Kiyko O.A., Guz M.M.** (2022). Research of the structure of stump and rootwood for effective use in the production of wood products. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2022, Vol. 64 (3), 131–142, doi: <https://doi.org/10.2478/ffp-2022-0011>
32. **Gayda S.V., Petryshak I.V.** (2020). Study of the influence of breed and grinding modes on the specific productivity of grinding skin. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:5-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204601>.
33. **Gayda S.V., Petryshak I.V., Humeniuk Zh.Ya.** (2021). Determination of the influence of rock and grinding modes on the surface roughness of wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:5-15 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214701>.
34. **Gayda S.V., Voytovych I.G.** (2017). Durability and stability of elements for beam furniture products made from post-consumer wood are investigated. *Bulletin of KhNTUA* 189:62-70 (in Ukrainian).
35. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). Дослідження технологічних процесів виготовлення ніжок столів обідніх різних конструкцій / *Doslidzhennya tekhnologichnykh protsesiv vyhotovlennya nizhok stoliv obidnikh riznykh konstruktsiy* [Research of technological processes of production of legs of tables of various designs]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:36-49, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204604>
36. **Grytsak S.A., Gayda S.V.** (2020). Comparative analysis of physical and mechanical characteristics of bent elements from different tree species. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:16-27 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204602>
37. **Grytsak S.A., Gayda S.V., Kushpit A.S., Salapak L.V.** (2023). Analysis of the efficiency of structural and technological solutions in the production of component units of lattice furniture products. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 61-72, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234905>
38. **Ivanyshyn T.V.** (2011). Методика розрахунку коефіцієнта використання робочого часу двоверстатних автоматизованих ліній з жорстким агрегуванням обладнання [Methodology for calculating the coefficient of utilization of working time of two-machine automated lines with rigid aggregation of equipment]. *Scientific Bulletin of UNFU* 21.6:67-71. (in Ukrainian).
39. **Ivanyshyn T.V.** (2011). Раціональна послідовність верстатів в автоматизованих лініях [Rational sequence of machines in automated lines]. *Scientific Bulletin of UNFU* 21.3:328-332. (in Ukrainian).
40. **Ivanyshyn T.V., Ozymok Yu.I., Kapral Yu.R.** (2022). Формалізація показників ефективності функціонування автоматизованої двоверстатної системи машин з жорстким агрегуванням обладнання [Formalization of performance indicators of the automated two-machine machine system with rigid equipment aggregation]. *Collection of scientific works of the VII International scientific and technical conference TK-22*, 19-21. (in Ukrainian).
41. **Ivanyshyn T.V., Valyukh O.A.** (2012). Формалізація якісних показників функціонування двоверстатної автоматизованої лінії з гнучким між агрегатним зв'язком [Formalization of quality performance indicators of a two-machine automated line with flexible inter-aggregate communication]. *Scientific Bulletin of UNFU* 22.14:370-374. (in Ukrainian).
42. **Street M.W.**, (2001). Quick Response Inventory Replenishment for a Photographic Material Supplier, M.B.A. and M.S. in Leaders for Manufacturing, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

43. **Mohamed-Chahir Fitouhi, Mustapha Nourelfath, Stanley B. Gershwin.** (2017). Performance evaluation of a two-machine line with a finite buffer and condition-based maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 166, October 2017, Pages 61-72, <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.03.034>
44. **Orikhovskyy R.Ya.** (2018). The influence of stability of technological operations on the efficiency of functioning of automatic lines in woodworking. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44:57-62 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184408> (in Ukrainian).
45. **Orikhovskyy R.Ya.** (2019). Research of reliability and stability of automatic lines in woodworking. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 45:112-116 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42194514> (in Ukrainian).
46. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2020). The influence of different parameters of stability of production sites on the efficiency of functioning of woodworking production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 46:49-53 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42204605> (in Ukrainian).
47. **Shuaichong Wei, Mustapha Nourelfath, Nabil Nahas.** (2023). Analysis of a production line subject to degradation and preventive maintenance *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 230, February 2023, 108906. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108906>
48. **Shuyuan Gan, Nan Shen.** (2023). Maintenance Optimization for a Production System Subject to Shocks Considering a Buffer Inventory and Production Defects. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 238, October 2023, 109487. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109487>
49. **Williams, D.I.** (2008). *Manufacturing systems: an introduction to the technologies.* – Open University Press Milton Keynes, England, 2008 p.
50. **Yifan Zhou, Yiming Guo, Tian Ran Lin, Lin Ma.** (2018). Maintenance optimisation of a series production system with intermediate buffers using a multi-agent FMDP. *Reliability Engineering & System Safety*. Vol. 180, December 2018, Pages 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.008>

UDC 658.527.011.56

*Assoc. prof. R.Ya. Orikhovskyy, PhD;
prof. S.V. Gayda, Doctor of Sciences – UNFU*

Determination of running time losses in automated processing systems of woodworking

A new method of calculating additional losses of running time in automated woodworking processing lines has been developed. This method is used thereafter for the analysis and synthesis of automated lines of woodworking manufacturing. For this purpose, the impact of woodworking manufacturing technological operations stability on the efficiency of the automated processing systems and technological lines functioning has been investigated. Small values of technological operations stability parameters, as well as imposed losses of machine running time are the main reasons for the low efficiency of automated processing systems at the woodworking industry enterprises. Woodworking and wood-base materials processing are significantly influenced by stochastic factors: size and quality characteristics of raw materials, parameters and conditions of technological equipment, manufacturing process organization, external influences. The new method makes it possible to consider the manufacturing process from the perspective of mass service theory and to use simulation modeling for studying the structure and layout of automated lines in order to increase the efficiency and productivity of their work. An important task for researchers is to estimate all components of labor time losses with high accuracy to ensure high manufacturing productivity. The amount of running time losses is affected by the number of consecutively working machines at the line. In automated lines with high stability of the technological equipment functioning, the automated line running time utilization ratio is significantly higher, the efficiency and productivity of woodworking process increases. It has been established that the efficiency of automated lines with sequential placement of machines decreases due to imposed losses of the machine's operation running time, which arise during the operation of the equipment. The impact on the production efficiency of all components of the equipment running time losses has been evaluated in order to reduce their impact on production efficiency and to ensure high productivity of automated woodworking processing lines. Proposed new method uses a correction factor for the calculation of automated lines, depending on the number of machines in the technological flow and takes into account the dependence of the running time-imposed losses degree on the number of machines. Method allows to calculate with higher accuracy the real processes of lines functioning.

Keywords: automated lines of woodworking manufacturing; woodworking equipment and machines; layout of technological lines; technological operations stability parameter; equipment running time losses; efficiency of automated processing systems.