



*Доц. Р.Я. Оріховський¹, к.т.н.; проф. С.В. Гайда², д-р техн. наук;
доц. С.А. Грицак³ канд. техн. наук; ст. викл. Л.В. Салапак⁴ – НЛТУ України*

ВИБІР ПОСЛІДОВНОСТІ ПРОДУКТИВНОСТЕЙ ВЕРСТАТІВ В АВТОМАТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМАХ ДЕРЕВООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

Розроблена методика вибору послідовності продуктивностей верстатів в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Методику доцільно використовувати для компонування автоматизованих ліній з оптимальною продуктивністю і ефективністю функціонування. Проведено аналізування технологічних операцій деревообробки та ефективність функціонування автоматизованих ліній. Встановлено, що причиною низької ефективності роботи автоматизованих ліній на підприємствах деревообробної галузі є низька стабільність технологічних операцій, а також неправильний вибір послідовності продуктивностей верстатів. Оброблювання деревини підлягає впливу стохастичного характеру. Розмірно-якісні характеристики сировини, стан технологічного устаткування, організація технологічного процесу мають значний вплив на продуктивність автоматичних ліній. Запропонована методика застосує імітаційне моделювання для дослідження структури автоматизованих ліній і підвищення їх продуктивності. Встановлено, що автоматизовані лінії з високо стабільним устаткуванням мають значно вищу ефективність і продуктивність виробництва.

Ключові слова: автоматизовані лінії деревообробного виробництва; деревообробні верстати; компонування автоматизованих ліній; параметр стабільності технологічних операцій; продуктивність автоматизованих ліній.

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

Проблемні аспекти дослідження:

- Різні типи деревини (особливо вторинна сировина – вживана деревина) мають неоднорідні властивості, через що продуктивність кожного верстата змінюється залежно від попередньої операції. Традиційні лінійні алгоритми планування не враховують варіативність характеристик перероблюваного матеріалу, що призводить до простоїв або перевантажень обладнання.
- Сучасні автоматизовані лінії часто спроектовані для великовантажного виробництва однакових деталей, тоді як переробка вживаної деревини вимагає швидкої переналагоджуваності [53, 57, 58, 62, 78, 81, 85-96,].
- Відсутність модульних рішень ускладнює інтеграцію нових верстатів або зміну їх порядку без масштабних простоїв. Поточні схеми переробки деревини часто не забезпечують повного

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 – академік 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

³ Грицак Степан Андрійович – канд. техн. наук, доцент, кафедра технології меблів і виробів з деревини. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-258-31-75, +38-097-904-20-70. E-mail: stepan.hrytsak@nltu.edu.ua

⁴ Салапак Любов Василівна – старший викладач, кафедра прикладної механіки і технології матеріалів. Тел.: +38-098-432-16-06. E-mail: yubov.salapak@nltu.edu.ua

замкненого циклу, через що значна частина вторинної сировини вилучається з виробничого потоку [1, 7, 23, 24, 45, 56, 70, 76, 83].

- Неефективне планування послідовності операцій призводить до підвищеної витрати електроенергії, пального та інструментального ресурсу [1, 2, 53, 57, 58, 62, 78, 81, 85-96,].
- Відсутність урахування залишкових властивостей матеріалу після кожної обробки може збільшувати обсяг відходів [4, 38, 47].
- Недостатній контроль за екологічною безпекою технологічних процесів меблевого та деревообробного виробництва сприяє забрудненню повітря, підвищенню викидів CO₂, а також інші проблеми [17, 22, 26, 28, 33, 56, 59, 60, 71, 73].

Актуальність дослідження:

- З розвитком циркулярної економіки [1, 2, 9, 19, 27, 38, 40, 41, 73, 52, 54] в ЄС і Україні зростає потреба у впровадженні технологій, що максимально використовують відновлювані ресурси й знижують залежність від лісозаготівель [3, 5, 10, 14, 17, 20, 23, 26, 27, 31, 34, 35, 46, 53, 57, 58, 62, 66, 71, 81]. Результати дослідження можуть бути апробовані як у великих промислових цехах, так і в модульних мобільних майстернях, що відкриває нові можливості для малих та середніх підприємств для виробництва різних матеріалів для меблевого виробництва, про що свідчать статистичні показники [17, 28, 32, 82].
- Оптимізація послідовності верстатів дозволить зменшити втрати та забезпечити стабільну якість кінцевого продукту з відходів деревини [4, 25, 34, 38, 47].
- В умовах частих змін ринку меблів та будівельних матеріалів виникає необхідність швидкої перебудови ліній під нові види продукції [8, 11, 12, 13, 16, 21, 36, 39, 51, 59, 60, 63, 67, 68, 69, 72, 74, 80].
- Розробка адаптивних алгоритмів планування забезпечить конкурентоспроможність виробництва та скорочення часу переналагодження.
- Раціональна послідовність верстатів сприятиме зменшенню енергоспоживання та подовженню строків служби інструментів. Екологічно безпечні методи обробки й максимально можливе використання вживаної деревини [6, 17, 20, 22, 26, 28, 30, 33, 56, 59, 60, 71, 73, 77] знижують вплив на довкілля та сприяють «зеленому» іміджу компаній.
- Запропоновані підходи сприятимуть прискоренню науково-технічного прогресу в галузі та інтеграції принципів Industry 4.0 у деревообробне виробництво. Детальний аналіз стану питання в деревообробному виробництві дає можливість зрозуміти вузькі місця [15, 17, 18, 19, 29, 42, 48, 49, 50, 61, 75, 78, 79].

Постановка завдання даного дослідження полягає у тому, що важливо з метою підвищення ефективності автоматизованих ліній деревообробки здійснити аналіз процесів функціонування обладнання. Важливо визначити можливі методи підвищення продуктивності автоматизованих ліній. Такі завдання досліджували англійські та американські науковці [97-102]. Науковці праці дослідників були присвячені вивченню виробничих процесів у машинобудуванні. Дослідження автоматизованих ліній деревообробної галузі здійснювали дослідники тривалий час [1, 2, 81, 85-96]. Пропонували різні шляхи збільшення продуктивності автоматизованих ліній. Найчастіше застосовували імітаційне моделювання для досліджування роботи автоматизованої лінії. Наші дослідження присвячені дослідженню автоматизованих ліній деревообробного виробництва, які мають свої особливості. Дослідження автоматизованих ліній деревообробних виробництв з метою підвищення ефективності функціонування та продуктивності є актуальними на теперішній час. Попередні дослідження [2] деревообробного виробництва не ураховували усі показники роботи верстатів. Важливо під час експлуатації обладнання забезпечувати високу продуктивність роботи використовуючи різні методи.

У науковій праці [98] розглядається інноваційна стратегія технічного обслуговування виробничої системи. Технологічна лінія включає несправний верстат і

має буферний запас для компенсації випадкових впливів. Із збільшенням кількості виконаних технологічних операцій стан верстата погіршується, тому зростає виробничий брак. Стохастичний процес збільшує кількість відмов у процесі роботи лінії. Для відновлення роботи верстата приймають рішення та здійснюють ремонт. Пропонується застосовувати гібридний метод оптимізації порядку обслуговування системи виробництва. Гібридний метод враховує застосування модифікованого методу прийняття рішень людиною. Застосовується імітаційне моделювання, метод Монте-Карло та застосовуються генетичні алгоритми (GA) для розв'язування завдань. Оператор лінії приймає рішення, вибирає необхідні заходи з технічного обслуговування, ураховує біжучу інформацію про стан виробничої системи. На основі математичної моделі, застосовуючи імітаційне моделювання Монте-Карло та GA, здійснюють корекцію параметрів оптимізації автоматизованої лінії. У науковій праці [97] проведено дослідження виробничої системи для оброблення неперервного потоку заготовок з двома верстатами, які підлягають профілактичному технічному обслуговуванню залежно від стану і мають проміжний буфер заданої місткості.

Аналізування наукових досліджень [2, 84, 102] дозволило визначити, що однією з причин малої ефективності функціонування автоматизованих систем є невисокі значення параметрів стабільності технологічних операцій. Ця особливість є характерною для процесів оброблення деревини і деревинних матеріалів.

Об'єкт дослідження – автоматизовані лінії деревообробного виробництва.

Предмет дослідження – методи вибору послідовності продуктивностей верстатів в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва, ефективність функціонування.

Мета роботи – оцінювання продуктивності обладнання та автоматизованих ліній, забезпечення високої продуктивності роботи деревообробних автоматизованих ліній. Для досягнення мети визначено такі **завдання дослідження**:

- здійснити аналіз наукових досліджень за даним напрямом;
- проаналізувати шляхи підвищення продуктивностей автоматизованих ліній деревооброблювального виробництва.

Аналіз наукових досліджень та наукових праць. Сучасні методи аналізування та оцінювання важливості впливу стабільності технологічних операцій на ефективність функціонування автоматизованих ліній є недосконалими. Наприклад, може використовуватися усереднене значення параметра стабільності для всіх верстатів автоматизованої лінії [2]. Методи розрахунку усереднених показників стабільності верстатів [93] розраховуються залежно від компонування технологічного обладнання в автоматизовану лінію. Розглядаються різні варіанти компонування верстатів в автоматизовану лінію: послідовне, паралельне або змішане компонування верстатів залежно від технологічного процесу оброблювання [8]. Для здійснення розрахунків коефіцієнтів використання робочого часу устаткування у двоверстатних лініях з жорсткими зв'язками проводилося імітаційне моделювання, сформульовані основні висновки і рекомендації з метою підвищення продуктивності автоматизованих ліній [2]. У наукових працях [86-92, 95] здійснено аналіз математичного апарату для моделювання процесів функціонування двоверстатної автоматизованої лінії з гнучкими зв'язками. Обчислені коефіцієнти використання робочого часу і продуктивності ліній. Запропоновано впорядкування

послідовності [94, 96] розміщування верстатів з різною продуктивністю для структур триверстатних автоматизованих ліній із стохастичними характеристиками. Встановлено ступені впливів параметрів Ерланга технологічних операцій на продуктивність автоматизованої лінії.

Розроблені рекомендації щодо компонування верстатів в автоматизовані лінії з урахуванням раціональної послідовності стабільностей верстатів. Науковці досліджують проблеми формалізації показників ефективності функціонування автоматизованих ліній з жорстким компонуванням устаткування [96]. За кордоном виконуються дослідження розроблення оптимальних структур компонування обладнання в автоматизовані лінії застосовуючи штучний інтелект [98]. Проаналізовано основні функції і структури гнучких автоматизованих виробничих систем. Підтверджено основні принципи формування систем автоматизованого контролю і керування технологічними процесами та гнучким автоматизованим виробництвом [96]. Вирішення проблем моделювання процесів роботи автоматизованих ліній здійснюють науковці Массачусетського технологічного інституту (англ. *Massachusetts Institute of Technology*) у США [99, 100].

Результати досліджень та їх обговорення. На підставі проведеного моніторингу і експериментальних пошуків проектування і застосування автоматичних ліній, гнучких автоматизованих виробництв сформувавши такі правила розрахунків та підбирання величин номінальних продуктивностей деревооброблювальних верстатів у послідовних технологічних лініях:

- найбільшу продуктивність має перший верстат в автоматичній лінії. Продуктивність наступних верстатів зменшується до кінця автоматичної лінії. Останній верстат в автоматичній лінії має найменшу продуктивність;
- всі верстати в автоматичній лінії мають однакову продуктивність;
- найбільшу продуктивність має останній верстат в автоматичній лінії. Продуктивність верстатів перед ним зменшується. Перший верстат в автоматичній лінії має найменшу продуктивність;
- в центрі автоматичної лінії зосереджені верстати з найбільшими величинами номінальних продуктивностей. З обох боків розміщені верстати з меншими продуктивностями. Найменш продуктивні верстати розміщуються у кінці і на початку автоматичної лінії.
- номінальна продуктивність кожного з верстатів вибрано відповідно з економічними витратами на кожній з технологічних операцій за критерієм номінальної величини сумарних економічних витрат. Але послідовність величин цих продуктивностей не впорядкована за жодним з цих правил.

Варіанти компонування автоматизованих ліній з послідовним агрегуванням верстатів з однаковою продуктивністю на практиці зустрічаються дуже рідко через дві причини. По-перше, такі автоматизовані лінії доцільно використовувати тільки для випадку рівномірного розподілу економічних витрат на виготовлення продукції. Така умова майже не здійснюється. По-друге, одне і теж технологічне устаткування в гнучких виробничих системах використовується для оброблення різних заготовок. Для різних видів продукції, устаткування працює з різною номінальною продуктивністю.

Для дослідження ефективності різних типів послідовних виробничих систем і правил упорядкування послідовностей продуктивностей верстатів у них, проводиться імітаційне моделювання процесів функціонування різноманітних варіантів ліній і технологічних потоків. У комп'ютерному експерименті цікавлять такі основні фактори: кількість верстатів або ліній, їхні номінальні продуктивності, спо-

сіб упорядкування послідовності верстатів в автоматизованій лінії. Ефективність автоматизованих ліній оцінюємо за допомогою економічного критерію та фактичною продуктивністю автоматизованої лінії в цілому.

У межах стабільності кількості верстатів в автоматизованій лінії та їх номінальних продуктивностей критерій найбільшої фактичної продуктивності буде задовільняти вимоги критерія найменших питомих витрат. Це пояснюється тим, що усі параметри технологічного устаткування залишаються тими ж самими, а змінюється тільки послідовність розміщування верстатів у автоматизованих лініях [1]. Тому найбільша продуктивність автоматизованої лінії буде забезпечувати найменше значення економічних витрат на одиницю продукції.

Середні величини досліджуваних показників ми розраховували за даними таблиці 1. Виконували 10 тисяч реалізацій моделюючого алгоритму в одному комп'ютерному експерименті. Кількість експериментів вибиралася у межах 7-10. У результаті обчислень отримали достатньо стабільні величини критеріїв оцінювання ефективності автоматизованої лінії. Фрагмент отриманих даних для лінії з 3-х верстатів подається в табл.1.

Таблиця 1. Відносна продуктивність лінії

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.743	1.5 – 1.0 – 2.0	0.742
2	0.751	1.0 – 1.5 – 2.0	0.750
3	0.768	1.0 – 2.0 – 1.5	0.766

З три верстатів за різними варіантами послідовностей компоновання можна сформулювати $3!$ варіантів автоматичних ліній. З цих шести варіантів найменшу продуктивність мають варіанти, у яких найменш продуктивний верстат розміщується у центрі лінії (варіанти I і II – пряма і зворотна послідовності). У розрахунках номінальні продуктивності верстатів (1.0, 1.5 і 2.0) і фактична продуктивність автоматизованої лінії Π_n подаються у відносних одиницях. Найменша продуктивність верстата у лінії для зручності аналізування у всіх варіантах приймається за одиницю. Найбільше значення накладання втрат робочого часу створюють верстати у лінії, які мають найдовшу тривалість технологічних операцій та найнижчу стабільність і таким чином найменшу номінальну продуктивність. У перших двох варіантах такий верстат розміщується у центрі автоматизованої лінії. Він спричинює створення підвищених накладених втрат робочого часу на обидва суміжні верстати у автоматизованій лінії. Тому фактична продуктивність автоматизованої лінії в даному процесі є найнижча серед усіх шести варіантів. У двох наступних варіантах компоновання лінії (III, IV) найменш продуктивний верстат взаємодіє тільки з одним попереднім (варіант III) або наступним (варіант IV) верстатами (табл. 2). З протилежної сторони він не має ніяких обмежень для своєї роботи. Тому такі варіанти компоновання ліній мають більш високу продуктивність.

Варіанти автоматичної лінії, що в їх центрі знаходиться найбільш продуктивний верстат, мають таку особливість, менш продуктивні верстати знаходяться на краях автоматичної лінії і мають у зв'язку з тим тільки одностороннє обмеження. Це зумовлює найвищу продуктивність двох останніх варіантів автоматичної лінії.

Об'єднання в автоматичні лінії чотирьох верстатів дає можливість проаналізувати 24 різних варіантів автоматичних ліній (табл. 2). Найбільш вузькими місцями цих варіантів будуть найменш продуктивні верстати і особливо в тому випадку, коли вони обидва разом знаходяться в центрі лінії (чотири варіанти).

Вищу продуктивність мають варіанти компоновання автоматичних ліній, в яких найменш продуктивний верстат розташований на краю лінії – на її початку або в кінці (варіанти 4 в табл. 2). Ще вищу фактичну продуктивність забезпечує компоновання автоматичних ліній, у яких верстати з найбільшою продуктивністю розташовуються ближче до центру автоматичної лінії. Такий варіант побудований за алгоритмом японських вчених К. Окамура і Г. Ямашина. Згідно з цим алгоритмом верстат з найменшою величиною номінальної продуктивності (1.0) розташований у кінці лінії. Наступний за величиною номінальної продуктивності (1.25) верстат поставлений на початку лінії. Третій за продуктивністю верстат розташовується перед першим (найменш продуктивним). І, нарешті четвертий, останній у даній лінії – після другого.

Таблиця 2. Продуктивність лінії з чотирьох верстатів

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів у лініях	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.654	2.0-1.25-1.0-1.5	0.654
2	0.657	2.0-1.0-1.25-1.5	0.656
3	0.655	2.0-1.5-1.0-1.25	0.658
4	0.659	2.0-1.5-1.25-1.0	0.662
5	0.667	2.0-1.0-1.5-1.25	0.664
6	0.667	2.0-1.25-1.5-1.0	0.668
7	0.671	1.5-2.0-1.0-1.25	0.667
8	0.670	1.5-1.0-2.0-1.25	0.674
9	0.676	1.5-2.0-1.25-1.0	0.675
10	0.682	1.5-1.25-2.0-1.0	0.686
11	0.682	1.25-2.0-1.5-1.0	0.688
12	0.692	1.25-1.5-2.0-1.0	0.690

У даному комп'ютерному експерименті, як і в попередньому, цілком виразно проявляється закономірність зростання фактичної продуктивності автоматичних ліній з впорядкуванням послідовності верстатів за їх продуктивністю. Кожний варіант послідовностей продуктивностей у автоматичній лінії випробовувався як в прямій послідовності (зліва-направо в таблицях 1 і 2), так і в зворотній (справа-наліво в табл. 1 і 2). Всередині кожної такої пари різниця фактичних продуктивностей автоматичної лінії незначна, і робити висновок про переваги однієї з послідовностей нема підстав.

Продовжимо аналізування результатів дослідження автоматичних ліній з п'яти, шести, одинадцяти верстатів. Тут кількість можливих варіантів компоновання досягає великих величин – 5!, 6!. Тому розглядаємо тільки найбільш характерні з них, щоб з'ясувати загальні закономірності і тенденції. Серед них найменш продуктивні варіанти автоматичних ліній (табл.3.), впорядковані за виділеними алгоритмами (табл. 3 в4), а найпродуктивніші варіанти (табл. 3, в12). Розглянемо їх детальніше. Як у попередніх компонованнях, найнижчу продуктивність

мають автоматичні лінії, в яких верстати з найменшою продуктивністю знаходяться в центрі лінії (табл.3, в1). Значний ефект підвищення фактичної продуктивності автоматичної лінії отримуємо за рахунок первинного упорядкування послідовності верстатів за їх номінальними продуктивностями (табл. 3, в2). Впорядкований за алгоритмом К. Окамури, Г. Ямашини варіант компонування лінії займає проміжне значення за продуктивністю автоматичної лінії (табл. 3, в7).

Таблиця 3. Продуктивність лінії з п'яти верстатів

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів у лініях	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.637	2.0-1.5-1.0-1.25-1.75	0.637
2	0.649	2.0-1.75-1.5-1.25-1.0	0.650
3	0.660	2.0-1.5-1.25-1.75-1.0	0.661
4	0.667	1.75-1.5-1.25-2.0-1.0	0.667
5	0.670	1.5-1.25-2.0-1.75-1.0	0.673
6	0.675	1.5-1.25-1.75-2.0-1.0	0.677
7	0.679	1.25-1.75-2.0-1.5-1.0	0.682
8	0.682	1.25-2.0-1.75-1.5-1.0	0.680
9	0.683	1.25-2.0-1.5-1.75-1.0	0.683
10	0.685	1.25-1.5-1.75-2.0-1.0	0.685
11	0.686	1.25-1.5-2.0-1.75-1.0	0.686
12	0.687	1.25-1.75-1.5-2.0-1.0	0.687

Впорядкування послідовності номінальних продуктивностей верстатів у автоматичних лініях з п'яти-шести верстатів (табл. 3 і табл. 4) дає змогу підвищити їх фактичну продуктивність у межах 8-12%. А це у два рази більше, ніж для коротких автоматичних ліній з кількістю верстатів у них до чотирьох.

Найбільше зниження фактичної продуктивності автоматичної лінії спостерігається тоді, коли верстати з малою продуктивністю концентрують разом, в одному місці (перших 3-4 варіанти ліній у табл. 4), особливо в центрі автоматичної лінії.

Таблиця 4. Фактична продуктивність лінії з шести верстатів

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів у лініях	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.551	1.5-1.3-1.1-1-1.2-1.4	0.552
2	0.554	1.5-1.1-1.3-1-1.2-1.4	0.553
3	0.556	1.5-1.1-1.3-1.2-1-1.4	0.557
4	0.559	1.5-1.4-1.3-1.2-1.1-1	0.560
5	0.579	1.1-1.3-1.4-1.2-1.5-1	0.575
6	0.576	1.1-1.3-1.5-1.4-1.2-1	0.577
7	0.576	1.1-1.5-1.3-1.2-1.4-1	0.577
8	0.577	1.1-1.3-1.5-1.2-1.4-1	0.578
9	0.578	1.1-1.5-1.3-1.4-1.2-1	0.578
10	0.579	1.1-1.4-1.3-1.2-1.5-1	0.579

Розведення таких верстатів на краї автоматичної лінії значно підвищує фактичну продуктивність лінії в цілому. Такі закономірності змінювання фактичної продуктивності автоматичної лінії більш чітко прослідковуються у довгих авто-

матичних лініях. Наприклад, в автоматичній лінії, що складається з одинадцяти послідовних верстатів (табл. 5).

Перші два варіанти автоматичної лінії мають найнижчу пропускну спроможність, як і в попередніх варіантах ліній, тому що декілька верстатів малої продуктивності зосереджуються в центрі (табл.5, в1) або в кінці лінії (табл. 5, в2).

У автоматичній лінії, що впорядкована за алгоритмом К. Окамури, Г. Ямашини (табл.5, в5), таке зосередження малопродуктивних верстатів спостерігається на обох кінцях автоматичної лінії, тому цей алгоритм не може вважатися базовим і перспективним для впорядкування послідовностей верстатів у лініях.

Таблиця 5. Фактична відносна продуктивність лінії з одинадцяти верстатів

NN зп	Фактична продуктивність лінії у зворотній послідовності	Послідовність номінальних продуктивностей верстатів у лініях	Фактична продуктивність лінії у прямій послідовності
1	0.540	1.9-1.7-1.5-1.3-1.1-1-1.2-1.4-1.6-1.8-2	0.539
2	0.556	2-1.9-1.8-1.7-1.6-1.5-1.4-1.3-1.2-1.1-1	0.557
3	0.568	1.7-1.5-1.3-1.1-1.9-1-2-1.2-1.4-1.6-1.8	0.570
4	0.594	1.5-1.6-1.4-1.7-1.3-1.8-1.2-1.9-1.1-2-1	0.594
5	0.596	1.1-1.3-1.5-1.7-1.9-2-1.8-1.6-1.4-1.2-1	0.597
6	0.601	1.1-1.9-1.5-1.7-1.3-2-1.2-1.6-1.4-1.8-1	0.602
7	0.603	1.1-1.9-1.3-1.5-1.7-2-1.6-1.4-1.2-1.8-1	0.603
8	0.604	1.1-1.9-1.7-1.3-1.6-1.4-1.5-1.8-1.2-2-1	0.606
9	0.605	1.1-1.9-1.5-1.8-1.2-1.6-1.4-1.7-1.3-2-1	0.605
10	0.606	1.1-1.9-1.3-1.7-1.5-1.6-1.4-1.8-1.2-2-1	0.608

Щоб вирахувати найбільш перспективні варіанти компонування автоматичних ліній, характерні риси цих варіантів та встановити закономірності їх формування, розглянемо подані вище типи автоматичних ліній детальніше. Виділимо з кожної групи автоматичних ліній лише по чотири варіанти, а саме, варіанти з найменшою продуктивністю, упорядковані за зменшенням (чи збільшенням) номінальних продуктивностей верстатів, які упорядковані за алгоритмом К.Окамури і Г.Ямашини, з попарним групуванням малопродуктивних і високопродуктивних верстатів (це варіанти з найбільшою продуктивністю).

Таблиця 6. Фактична відносна продуктивність автоматичних ліній для різних правил упорядкування послідовностей продуктивностей верстатів

NN зп	Правила впорядкування продуктивностей	Кількість верстатів та межі їх продуктивностей						
		3 1-2	4 1-2	5 1-2	6 1-2	6 1-1.5	8 1-2	11 1-2
1	Централізація малих продуктивностей 	0.742	0.654	0.637	0.607	0.551	0.587	0.539
2	Спадання величин продуктивностей 	0.750	0.660	0.650	0.622	0.560	0.601	0.556
3	Централізація великих продуктивностей 	0.767	0.688	0.680	0.659	0.576	0.635	0.596
4	Попарне групування 	—	0.691	0.683	0.661	0.577	0.638	0.601
5	Впорядкування парами 	—	0.691	0.687	0.663	0.579	0.641	0.607

В такому порядку зведемо їх у табл. 6. Алгоритми компоновання автоматичних ліній умовно називаємо так: I варіант – централізація малих продуктивностей; II варіант – спадання продуктивностей верстатів; III варіант – централізація великих продуктивностей; IV варіант – попарне групування продуктивностей; V варіант – впорядкування пар устаткування (або впорядкування парами). Оскільки ймовірність накладання втрат робочого часу у лінії прямопропорційна до тривалості інтервалу випуску та оберненопропорційна до стабільності, тому найбільші втрати часу спостерігаються в автоматичних лініях, у яких допускається найбільша концентрація технологічного устаткування малої продуктивності і низької стабільності (табл.6, в1). Для автоматичних ліній з 5-8 жорстко з'єднаних верстатів значення накладених втрат робочого часу складає 35-40%. У зв'язку з цим такі автоматичні лінії мають найменшу продуктивність.

Впорядкування послідовностей продуктивностей верстатів у автоматичних лініях усіх варіантів однозначно знижує накладені втрати робочого часу і підвищує їх продуктивності. Закономірності змінювання накладених втрат робочого часу і фактичної продуктивності автоматичної лінії для всіх варіантів компоновання автоматичних ліній і для усіх правил впорядкування продуктивностей верстатів у лінії залишаються стабільними. Тому на підставі аналізування спільних особливостей можна сформулювати правило побудови варіантів компоновання автоматичних ліній з найбільшою пропускною здатністю.

У підсумку бачимо (табл. 6), що величини накладених втрат, фактичної продуктивності та їх змінювання однозначно залежать від кількості верстатів у автоматичних лініях та діапазону розсіювання номінальних продуктивностей верстатів. Варіанти автоматичної лінії, які зкомпоновані з шести верстатів відрізняються між собою верхньою межею номінальної продуктивності. Для варіанта 6 ряд продуктивностей: 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, а для варіанта 6' (табл.6) – 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5. Варіант 6 з трьома верстатами більш високої продуктивності (1.6, 1.8, і 2.0), ніж варіант 6'. Ефективність впорядкування продуктивностей з більшим діапазоном їх розсіювання теж буде вища.

Зі збільшенням кількості упорядкованих верстатів **а** в автоматичній лінії дуже швидко зростає ефективність упорядкування. Збільшення кількості верстатів від 3-4-х до 5-6-ти подвоює зростання продуктивності автоматичної лінії. Збільшення кількості верстатів у лінії до 11-12-ти – потроєє зростання.

З чотирьох виділених правил розміщування номінальних продуктивностей верстатів у автоматичних лініях, ефективною виділяється три останніх правила. Важливим є централізація великих продуктивностей. Верстати з найменшою продуктивністю розподіляються на краї автоматичної лінії. Попарне групування верстатів передбачає, що кожний верстат з малою продуктивністю komponується поруч з верстатом із великої продуктивності. Упорядкування верстатів парами, ураховує, що кожна з пар розміщується таким чином, щоб розподілити малопродуктивні верстати.

Перше з указаних **правил** (алгоритм К. Окамури, Г. Ямащини) створює добрі результати для автоматичних ліній з 3-4-х верстатів. Для три верстатів таке правило дає найкращий варіант. Для автоматичних ліній з чотирьох верстатів трохи кращий варіант можна отримувати шляхом попарного групування (табл.6). Для автоматичних ліній з п'яти верстатів таких варіантів уже може бути кілька.

Згідно першого алгоритму упорядкування малі продуктивності верстатів тільки розносять на краї автоматичної лінії. Вони зосереджуються там і утворюють два «вузькі місця»: на початку і в кінці автоматичної лінії. Тому цей алгоритм упорядкування забезпечує оптимізацію послідовностей продуктивностей верстатів тільки в коротких автоматичних лініях (з три верстатів).

Друге правило передбачає групування продуктивностей верстатів по два верстати у кожному парі. Перша пара продуктивностей верстатів утворюється з найбільшої та найменшої величин. Друга пара формується, відповідно, з другої та передостанньої величин продуктивностей і т.д. Таке «парування» не дозволяє безпосередньо стикуватися малопродуктивному устаткуванню (табл. 5). Наявність біля кожної малої величини продуктивності великої значно обмежує наростання накладених втрат робочого часу. В тому полягає перевага правил попарного групування.

Третє правило враховує переваги двох попередніх правил. Отримані за попереднім правилом пари продуктивностей верстатів ще упорядковуються. Ці заходи забезпечують рознесення малих продуктивностей верстатів на краї автоматичної лінії і рівночасно розділяють їх верстатами з великими продуктивностями. Тому скомпоновані таким чином варіанти ліній забезпечують найбільшу пропускну здатність.

Алгоритм упорядкування автоматичних ліній парами верстатів складається з кроків:

1. **N** кількість верстатів, з яких компонується автоматична лінія чи гнучка виробнича система, номерують за порядком зростання величини їх номінальних продуктивностей. Першими у ряді будуть найменш продуктивні верстати. Найпродуктивніший верстат матиме номер **n**.

2. Перша пара продуктивностей верстатів формується з першого й останнього верстатів: **1,n**; друга пара формується з другого й передостаннього за продуктивністю верстатів: **2,n-1** і т.д. Таку послідовність пар верстатів записують у вигляді рядів: 1, n; 2, n-1; 3, n-2; ...; n/2, n/2+1; – n/2 пар для **n**-парного і 1, n; 2, n-1; 3, n-2; ...; (n-1)/2, (n+3)/2; (n+1)/2; – (n-1)/2 пар плюс (n+1)/2 -ий верстат для **n** непарного. З отриманих таким чином **n/2** або **(n+1)/2** груп компонується автоматична лінія.

3. Перша пара продуктивностей верстатів розміщується на початку автоматичної лінії. Друга пара продуктивностей верстатів розміщується у кінці автоматичної лінії. Третя пара продуктивностей верстатів розміщується після першої пари, четверта пара перед другою парою і т.д. Рівночасно в кожній парі першої половини автоматичної лінії першим ставлять менш продуктивний верстат, а в другій половині автоматичної лінії розміщують більш продуктивний верстат. Таким чином отримуємо повну послідовність всіх пар продуктивностей верстатів для **n**-парного компонування:

$$1, n; 3, n-2; \dots; \frac{n}{2}-1, \frac{n}{2}+2; \frac{n}{2}, \frac{n}{2}+1; \dots; n-3, 4; n-1, 2 \quad (1)$$

за умови, що кількість пар **n/2** є парною, і для непарної кількості пар верстатів:

$$1, n; 3, n-2; \dots; \frac{n}{2}-2, \frac{n}{2}+3; \frac{n}{2}, \frac{n}{2}+1; \frac{n}{2}+2, \frac{n}{2}-1; \dots; n-3, 4; n-1, 2. \quad (2)$$

Для непарної кількості верстатів n у лінії маємо таку послідовність продуктивностей верстатів:

$$1, n; 3, n-2; \dots; \frac{n-3}{2}, \frac{n+5}{2}; \frac{n+1}{2}; \frac{n+3}{2}, \frac{n-1}{2}; \dots; n-3, 4; n-1, 2 \quad (3)$$

за умови, що кількість пар верстатів $(n-1)/2$ є парною, і для непарної кількості пар верстатів $(n-1)/2$:

$$1, n; 3, n-2; \dots; \frac{n-1}{2}, \frac{n+3}{2}; \frac{n+1}{2}; \dots; n-3, 4; n-1, 2. \quad (4)$$

Сформульований тут алгоритм упорядкування номінальних продуктивностей послідовних верстатів дає можливість істотно знизити накладені втрати робочого часу і підвищити пропускну здатність автоматичних ліній, гнучких виробничих систем, з послідовних елементів з різною пропускну здатністю.

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 урахує оптимальні послідовності продуктивностей верстатів для розрахунку автоматизованих ліній залежно від порядку розташування верстатів у технологічному потоці та кількості верстатів. Методика дає можливість з високою точністю обчислювати реальні процеси функціонування автоматизованих ліній деревооброблювального виробництва. Результати роботи дозволяють сформулювати наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – вперше розроблена методика встановлення послідовностей верстатів автоматизованих ліній деревообробки з різними значеннями продуктивностей та різними стабільностями технологічних операцій. Практична значущість результатів дослідження – результати наукового дослідження доцільно застосувати для визначення параметрів роботи автоматизованих ліній деревообробної галузі із урахуванням особливостей функціонування деревооброблювальних верстатів.

Висновки. Виконані дослідження встановлюють оптимальні послідовності вибору продуктивностей верстатів в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Методику доцільно використовувати для компонування автоматизованих ліній з оптимальною продуктивністю і ефективністю функціонування. Стабільність технологічних операцій деревообробного виробництва значно впливає на ефективність функціонування автоматизованих виробничих систем.

1. Пропускна здатність (продуктивність) автоматичних ліній і послідовних виробничих систем значно залежить від послідовності та сукупності співвідношень номінальних продуктивностей сусідніх верстатів у лінії. Найбільші втрати продуктивності у послідовних виробничих системах трапляються там, де зосереджується верстати із малою пропускну здатністю або з низькою стабільністю функціонування. Ефективну компенсацію накладання втрат робочого часу в автоматичній лінії і продуктивності можна реалізувати за допомогою розміщування на краї автоматичної лінії верстатів з малою продуктивністю, установа буферних запасів або високопродуктивного устаткування між такими верстатами.

2. Сформульований алгоритм отримання максимальної продуктивності автоматичних ліній і послідовних виробничих систем за обмежену кількість кроків вирішує завдання оптимального компонування автоматичних ліній. Алгоритм використовується для проектування нових автоматичних ліній і для реконструкції експлуатованих ліній. Він враховує реальні умови функці-

онування. Ефективність упорядкування послідовності продуктивностей верстатів у автоматичній лінії значно зростає зі збільшенням кількості верстатів у лінії та діапазону величин їх номінальних продуктивностей, стабільності роботи.

References

1. **Benny S. Budiman.** (2004). Optimal Capacity Adjustment for Supply Chain Control. Massachusetts Institute of Technology. – 106 p.
2. **Dudyuk D.L., Maksymiv V.M., Orikhovsky R.Ya. et al.** (1996). An imitation design of the flexible automated lines is in a industrial forestry complex: Monograph. – Kyiv: ISDO. – 140 p.
3. **Gayda S.V.** (2007). Research of concentration of operations is in modern furniture Productions. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 33:73-79 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073314>
4. **Gayda S.V.** (2013). Techniques for utilization of post-consumer wood in the production of fuel pellets and briquettes. Proceedings of the XXI International symposium Adhesives in Woodworking Industry (Slovakia, Zvolen Juve 23-26. 2013). TU Zvolen, 119-130.
5. **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).
6. **Gayda S.V.** (2013). The technologies and recommendations for the use of post-consumer wood in wood processing. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 39(1).48-67, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42133909>
7. **Gayda S.V.** (2013). Основи формування класифікатора вторинних деревинних ресурсів / *Osnovy formuvannya klasyfikatora vtorynnykh derevyynykh resursiv* [Bases of secondary wood resources classifier formation]. *Scientific Works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine* 11:208-215 (in Ukrainian). <https://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/355>
8. **Gayda S.V.** (2014). *Teoreticheskoye obosnovaniye podkhoda po prognozirovaniyu prochnosti drevesnostruzhechnykh plit iz vtorychno ispol'zuyemoy drevesiny* [The theoretical rationale for the approach on the prediction the strength of particleboard from recycled wood]. *Actual problems* 38:212-216.
9. **Gayda S.V.** (2016). Ecological and technological aspects of recycling post-consumer wood for production compacted materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry bulletin of MSFU* 20(3).15-22.
10. **Gayda S.V.** (2016). Технологічні підходи до поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом [Technological approaches to cleaning of surface of post-consumer wood of needle-milling tools]. *Bulletin of KhNTUA* 178:3-11(in Ukrainian).
11. **Gayda S.V.** (2016). A investigation of form of stability of variously designed blockboards made of post-consumer wood // *ProLigno : Scientific Journal. «TRANSILVANIA» din Brasov.* 12(1).22-31.
12. **Gayda S.V.** (2016). Research on physical and mechanical characteristics of front blockboards made from post-consumer wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry.* 42:33-50. doi: <https://doi.org/10.36930/42164206>
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.
14. **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>
15. **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>.
16. **Gayda S.V.** (2018). Strength of combined blockboard made of post-consumer wood (PCW). *Bulletin of KhNTUA* 197:3-9, (in Ukrainian).
17. **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).

18. **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>
19. **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>
20. **Gayda S.V.** (2013). The technological solutions for recycling of post-consumer wood. *Proceedings of I International Conference (Ukraine, 14-16 March 2013) UNFU: Lviv*, 5-11.
21. **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/10.15421/412135>
22. **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>.
23. **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>.
24. **Gayda S.V., Kiyko O.A.** (2021). 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). doi: <https://doi.org/10.15421/412135>
25. **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>.
26. **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>
27. **Gayda S.V., Kushpit A.S., Huber Yu.M.** (2023). Analysis of implementation of Industry 4.0 principles in furniture production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 73-84, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234906>
28. **Gayda S.V., Lesiv L.E.** (2023). Mathematical model of forecasting volumes of post-consumer wood production. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49:33-47, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234903>
29. **Gayda S.V., Maksymiv V.M.** (2007) Analysis, features, problems and experience of the use of additional resources of raw material – wastes and of used wood // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 33:63-73. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073313>
30. **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.
31. **Gayda S.V., Voytovych I.G., Orikhovskyy R.Ya.** (2020). 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>
32. **Gayda, S., Dyak, T.** (2011). The analysis of economic efficiency of post-consumer wood use for particleboard manufacture for LLC Swisspan Limited // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 37.2:129-136. doi: <https://doi.org/10.36930/421137221>
33. **Gayda, S.V.** (2007). Проблема деревної сировини у Європі та Україні / *Problema derevnoyi syrovyny u Yevropi ta Ukrayini* [A problem of arboreal raw material is in Europe and Ukraine]. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 33:55-63 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/42073312>
34. **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>
35. **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>

36. **Lesiv L.E.** (2022). Study of the characteristics of combined of blockboards made of post-consumer wood. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*. 48:69-86, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214806>
37. **Medvid L.M.** (2021). Post-consumer wood – an additional reserve of raw materials for construction materials. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 47:34-46, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214706>
38. **Medvid L.V.** (2018). Systematization of wood waste – the basis of their effective use // *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 44: 91-104, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42184412>
39. **Medvid L.V., Gayda S.V.** (2023). Determination of the strength indicators of normal blockboard made of post-consumer wood . *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 49: 85-98, (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42234907>
40. **Murray A., Skene K., Haynes K.** (2017). The circular economy: an interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context. *J. Bus. Ethics*, № 140(3). P. 369-380. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>.
41. **Project «CircHive – Developing & piloting biodiversity footprinting & natural capital accounting via a ‘beehive’ of sectoral hubs, for sustainable transition to a circular EU bioeconomy».** Project Schedule: Start Date 01.12.2022 End Date 30.11.2027.
42. **Ratajczak E.** (2003). *Zasoby odpadów drzewnych w Polsce* / E. Ratajczak, A Szostak. Poznan: Czysta Energia,– Vol. 6. – P. 122-125.
43. **Reike D., Vermeulen Walter J.V.** (2018). The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? // *Resources, Conservation and Recycling*. P. 246-264.
44. **Shevchenko T. I., Shuptar-Porivayeva N. Y., Gubanov O. R. and others.** (2022). Циркулярна економіка [Circular economy]. Sumy: University book. – 220 p. (in Ukrainian).
45. **Suominen T., Kunttu J., Jasinevičius G., Tuomasjukka D. & Lindner M.** (2017). Trade-offs in sustainability impacts of introducing cascade use of wood, *Scandinavian Journal of Forest Research*, 32:7,588-597, doi: [10.1080/02827581.2017.1342859](https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1342859).
46. **Titus, B.D., Brown, K., Helmisaari, H.S. et al.** (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energ S So* 11, 10. doi: <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.
47. **Tuomasjukka D., Athanassiadis D. & Vis M.** (2017). Threefold sustainability impact assessment method comparison for renewable energy value chains, *International Journal of Forest Engineering*, 28:2, 116-122, doi: <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1318549>.
48. **Werner F., Taverna R., Hofer P., Thürig E., Kaufmann E.** (2010). National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environ. Sci. Pol.*, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.10.004>.
49. **Гайда С.В.** Аналіз динаміки показників основних конструкційних матеріалів в контексті циркулярної економіки. *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть.* – 2024, вип. 50. – С. 29-40. doi: <https://doi.org/10.36930/42245003>
50. **Гайда С.В.** Аналіз тенденції основних показників деревозаготовчої галузі в контексті циркулярної економіки. *Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть.* – 2024, вип. 50. – С. 4-15. doi: <https://doi.org/10.36930/42245001>
84. **Гайда С.В.** Визначення характеристик столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез МН-ПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 118-120. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
51. **Гайда С.В.** Встановлення показника циркулярності в лісовому секторі: матеріали тез XIV МН-ПК (23-24.05.2024 р.). – Чернівці : НУ «ЧП», 2024. – Т.2. – С. 192-194.
52. **Гайда С.В.** Основи створення гнучких виробничих систем. Гнучкі автоматизовані виробництва та робототехніка в деревообробці: Ч.1. – Львів: ЦНТЕІ, 1998. – 149 с.
53. **Гайда С.В.** Реалізація принципів циркулярної економіки в лісовому секторі: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 110-112. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>

54. **Гайда С.В.** Технології вживаної деревини як дієві механізми для реалізації принципів циркулярної економіки: матеріали тез Н-ПК (05-06.06.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17079555>
55. **Гайда С.В., Гузь М.М., Никитюк Л.О.** Корневая древесина-источник дополнительного сырья для плитного производства. Тези НТК (21-25.09.92). Архангельск:ЦНИИМОД. – С.88-89.
56. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я.** Оперативно-виробниче планування гнучких виробничих систем // Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 2000. – 29 с.
57. **Гайда С.В., Кшивецький Б.Я.** Проектування гнучких виробничих систем: Метод. вказівки. – Львів : ЦНТЕІ, 1998. – 34 с.
58. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Міцність комбінованих столярних плит із вживаної деревини ялиці: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 128-130. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
59. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Побудова моделі міцності зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці: матеріали тез Н-ПК (7-8.10.2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 187-189. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
60. **Гайда С.В., Лесів Л.Е.** Порівняльний аналіз комбінованих столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез XIV МН-ПК (24-25.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 215-217. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
61. **Гайда С.В., Луценко А.О.** Гнучкі деревообробні виробництва – база для реалізації та адаптації САД-систем на основі Imos для проектування виробів із деревини: матеріали тез Н-ПК (24-25.05.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 131-133. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
62. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Дослідження міцності при статичному згині столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез Н-ПК (7-8.10.2024 р.). – Харків : ДБТУ, 2024. – С. 193-195. <https://biotechuniv.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/conf-07-08-10-24-mater.pdf>
63. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Міцність звичайних столярних плит із вживаної деревини: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 213-214.
64. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Побудова математичної моделі міцності столярних плит різних конструкцій із вживаної деревини. Наукові праці Лісівничої академії наук України : зб. наук. праць. – 2024, вип. 27. – С. 180-189. <https://doi.org/10.15421/412426>
65. **Гайда С.В., Медвідь Л.В.** Технологія поверхневого очищення вживаної деревини голкофрезерним інструментом: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 134-136. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
66. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Вплив товщини рейок на формостійкість меблевих щитів: Матеріали тез XV МН-ПК (22–23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 184-186. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
67. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Забезпечення площинності меблевих щитів із бука європейського: матеріали тез Н-ПК (24-25.04.2025 р.). – Харків : ДБТУ, 2025. – С. 137-139. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15849808>
68. **Гайда С.В., Подібка Т.І.** Формостійкість меблевих щитів із сосни звичайної: матеріали тез XIV МН-ПК (23–24 травня 2024 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2024. – Т.1. – С. 211-212.
69. **Гайда С.В., Удовиський О.М., Салабай Р.Г.** Міцність столярно-будівельного погонажу із зрощених MDF-заготовок: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.2. – С. 150-151. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
70. **Гайда, С.В.** Перспективи роботизації меблевої промисловості України. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2003. – Вип. 11 – С. 36-37.
71. **Гайда, С.В.** Прогресивні плитні матеріали MDF та OSB. Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 1 – С. 30-32.
72. **Гайда, С.В.** Що нам важко стілець зробити? Обладнання та інструмент для професіоналів. – Харків: Graf-X. – 2004. – Вип. 3 – С. 44-52.
73. **Грицак С.С., Грицак С.А., Гайда С.В.** Встановлення залежності довжини бездефектної дуги деревини ясеня від змінних факторів гнуття: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 196-198. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>

74. **Киянка В.В., Гайда С.В.** Визначення динаміки утворення деревинних залишків та відходів виробничої діяльності на ТзОВ «Фортуна-меблі». Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2024, вип. 50. – С. 103-116. doi: <https://doi.org/10.36930/42245009>
75. **Лесів Л.Е., Гайда С.В.** Залежність міцності зрощених заготовок від характеристик зубчастого з'єднання: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 192-194. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
76. **Лесів, Л.Е., Гайда, С.В., Салапак, Л.В.** Розроблення математичної моделі міцності зрощених заготовок із вживаної деревини ялиці. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2024, вип. 50. – С. 16-28. doi: <https://doi.org/10.36930/42245002>
77. **Луценко А.О., Гайда С.В., Кійко О.А.** Адаптація програмного забезпечення для мобільних та гнучких меблевих виробництв: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 173-174. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
78. **Максимів В.М., Гайда С.В.** Аналіз, особливості, проблеми та досвід використання додаткових ресурсів сировини – відходів та вживаної деревини. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2007, вип. 33. – С. 63-73. <https://doi.org/10.36930/42073313>
79. **Медвідь Л.В., Гайда С.В.** Математична модель формостійкості звичайних столярних плит із вживаної деревини: Матеріали тез XV МН-ПК (22-23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.1. – С. 188-190. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
80. **Оріховський Р.Я., Гайда С.В.** Оцінювання ефективності використання робочого часу в автоматизованих виробничих системах деревообробного виробництва. Ліс. госп-во, ліс., папер. та деревооб. пром-сть. – 2024, вип. 50. – С. 41-51. doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
81. **Смаль В.І.** Публічний звіт голови державного агентства лісових ресурсів України за 2024 рік, 65 с. <https://www.openforest.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/zvit-holovy-derzhavnoho-ahentstva-lisovykh-resursiv-ukrainy-za-2024-rik.pdf>
82. **Удовичський О.М., Гайда С.В. Салабай Р.Г.** Некондиційна деревина у бетонних виробках: Матеріали тез XV МН-ПК (22–23.05.2025 р.). – Чернігів : НУ «ЧП», 2025. – Т.2. – С. 141-142. <https://conference-chernihiv-polytechnik.com/kzyatps-2025/>
83. **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. 166: 61-72, <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.03.034>
84. **Orikhovskyy R.Ya.** (2019). Research of reliability and stability of automatic lines in wood-working. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 45: 111-114. doi: <https://doi.org/10.36930/42194514>
85. **Orikhovskyy R.Ya.** (2007). Increasing the reliability of automated production systems in the forestry complex. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 33: 41-45.
86. **Orikhovskyy R.Ya.** (2008). Parameters of reliability of the automated manufacturing systems in a wood-working industry. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 34: 163-167.
87. **Orikhovskyy R.Ya.** (2010). The reliability of the automated production systems in wood-working industry. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 36: 112-116.
88. **Orikhovskyy R.Ya.** (2011). Problems of reliability of hardwares in computer-aided systems of technological processes control. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 37(2). 50-52.
89. **Orikhovskyy R.Ya.** (2012). The influence of hardware reliability on technological indexes of efficiency. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 38: 69-72.
90. **Orikhovskyy R.Ya.** (2013). Research on the influence of equipment reliability on the efficiency of automatic lines operation. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 39(1). 24-27.
91. **Orikhovskyy R.Ya.** (2016). The influence of equipment reliability on the stability of manufacturing operations and efficiency of auto-mated production systems. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 42: 13-15. doi: <https://doi.org/10.36930/42164202>
92. **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: 58-63. doi: <https://doi.org/10.36930/42184408>
93. **Orikhovskyy R.Ya.** (2021). The estimation of losses of working time in production systems and work stability of automatic lines in the field of woodworking . Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry 47:16-21 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42214702>

94. **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>
95. **Orikhovskyy R.Ya., Gayda S.V.** (2024). Determination of runnibg time losses in automated processing systems of woodworking. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 50: 41-51 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.36930/42245004>
96. **Shuaichong Wei, Mustapha Nourelfath, Nabil Nahas.** (2023). Analysis of a production line subject to degradation and preventive maintenance *Reliability Engineering & SystemSafety*. Vol. 230, Feb.2023,108906.<https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108906>
97. **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, 109487. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109487>
98. **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, MA.
99. **Tan B. and Gershwin S.B.** (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.*
100. **Williams D.I.** (2008). *Manufacturing systems: an introduction to the technologies.* – Open University Press Milton Keynes, England, 2008 p.
101. **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* 180: 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.res.2018.07.008>

UDC 658.527.011. *Assoc. prof. R.Ya. Orikhovskyy, PhD; prof. S.V. Gayda, Doctor of Sciences; assoc. prof. S.A. Grytsak, PhD; senior lecturer L.V. Salapak – UNFU*

Choice of the sequence of productivity of machinery in automated production systems of the woodworking manufacturing

A method for selecting the sequence of machine tool productivity in automated production systems of woodworking production has been developed. The method is expedient to use for arranging automated lines with optimal productivity and efficiency of functioning. An analysis of technological operations of woodworking and the efficiency of functioning of automated lines has been carried out. It has been established that the reason for the low efficiency of automated lines at enterprises of the woodworking industry is the low stability of technological operations, as well as the incorrect selection of the sequence of machine tool productivity. Wood processing is subject to stochastic influences. The dimensional and qualitative characteristics of raw materials, the state of technological equipment, and the organization of the technological process have a significant impact on the productivity of automatic lines. The proposed methodology uses simulation modeling to study the structure of automated lines and increase their productivity. It has been established that automated lines with highly stable equipment have significantly higher efficiency and production productivity.

Keywords: automated woodworking production lines; woodworking machines; layout of automated lines; stability parameter of technological operations; productivity of automated lines.