

ISSN: 2304-4519
eISSN: 2312-0584

17 (1) 2025

Технологічні комплекси науковий журнал

scientific journal

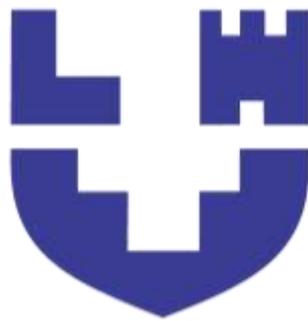
Technological Complexes



МІНІСТЕРСТВО НАУКИ ТА ОСВІТИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ

ISSN 2304-4519
(Print)



ISSN 2312-0584
(Online)

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
2025, Том 17, №1

Заснований у січні 2010 року

Головний редактор: проф., д-р техн. наук, заслужений діяч
науки і техніки України – Богдан ПАЛЬЧЕВСЬКИЙ

ЛУЦЬК • 2025

Технологічні комплекси : наук. журнал. Одеса :
Видавничий дім «Гельветика», 2025. Т. 17. № 1. 114 с.

Видання зареєстровано рішенням Національної ради
України з питань телебачення і радіомовлення, як
суб'єкта у сфері друкованих медіа (рішення №1413 від
25 квітня 2024 року, ідентифікатор медіа R30-03928).

Рекомендовано до друку Науково-технічною радою
Луцького національного технічного університету
(протокол № 13 засідання від 21 червня 2025 року)

«Технологічні комплекси» є науковим виданням України, у
якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт
на здобуття наукових ступенів доктора філософії та доктора
технічних наук.

Засновник: Луцький національний технічний університет.

Мова розповсюдження: українська та англійська.

Періодичність: 4 рази на рік.

Адреса редакції: Україна, 43018, вул. Львівська, 75,
м. Луцьк, Луцький національний технічний університет.

тел. +38(067)9741088

E-mail: tcomplex@lntu.edu.ua

сайт журналу: <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/tcomplex>

Головний редактор:**Editor-in-Chief:****Богдан ПАЛЬЧЕВСЬКИЙ** (Україна)**Bogdan PALCHEVSKYI** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-4000-4992](https://orcid.org/0000-0002-4000-4992)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Заступник головного редактора:**Deputy Editor-in-Chief:****Любов КРЕСТЬЯНПОЛЬ** (Україна)**Lyubov KRESTYANPOL** (Ukraine)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0000-0003-3617-7900](https://orcid.org/0000-0003-3617-7900)

PhD, Ass. Prof.

Олег КАЙДИК (Україна)**Oleh KAILYK** (Ukraine)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0000-0002-3620-270X](https://orcid.org/0000-0002-3620-270X)

PhD, Ass. Prof.

Редакційна колегія:**Editorial board:****Зіновій СТОЦЬКО** (Україна)**Zinoviy STOTSKO** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0003-0423-8561](https://orcid.org/0000-0003-0423-8561)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Йордан Т. МАКСИМОВ (Болгарія)**Jordan T. MAXIMOV** (Bulgaria)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-8797-1525](https://orcid.org/0000-0002-8797-1525)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Антоні СЬВИЦЬ (Польща)**Antoni ŚWIĆ** (Poland)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0003-0405-4009](https://orcid.org/0000-0003-0405-4009)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Міхал БЕМБЕНЕК (Польща)**Michał BEMBENEK** (Poland)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-7665-8058](https://orcid.org/0000-0002-7665-8058)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Луїс Фр'юлен РІБЕЙРУ (Португалія)**Luis Frólén RIBEIRO** (Portugal)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0003-4336-6216](https://orcid.org/0000-0003-4336-6216)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Йоріс ВЕЗІС (Литва)**JORIS VEZYS** (Lithuania)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0009-0000-3731-0588](https://orcid.org/0009-0000-3731-0588)

PhD, Ass. Prof.

Андрій КУЦИК (Польща)**ANDRIY KUTSYK** (Poland)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-7832-609X](https://orcid.org/0000-0002-7832-609X)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Юрій КУЗНЕЦОВ (Україна)**Yurii KUZNIETSOV** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-5107-3600](https://orcid.org/0000-0002-5107-3600)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Федір МАТИКО (Україна)**Fedir MATIKO** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0001-6569-2587](https://orcid.org/0000-0001-6569-2587)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Роман ФЕДОРИШИН (Україна)**Roman FEDORYSHYN** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-1972-8662](https://orcid.org/0000-0002-1972-8662)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Вадим СТУПНИЦЬКИЙ (Україна)**Vadym STUPNYTSKYI** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-0921-3980](https://orcid.org/0000-0002-0921-3980)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Іван РЕГЕЙ (Україна)**Ivan REHEI** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-3395-2994](https://orcid.org/0000-0002-3395-2994)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Сергій САПОН (Україна)**Serhii SAPON** (Ukraine)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0000-0003-1082-6431](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

PhD, Ass. Prof.

Віктор РУДЬ (Україна)**Viktor RUD** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0001-5025-9510](https://orcid.org/0000-0001-5025-9510)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Олександр ПОВСТЯНОЙ (Україна)**Oleksandr POVSTIANOI** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-1416-225X](https://orcid.org/0000-0002-1416-225X)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Микола ЯРОШЕВИЧ (Україна)**Mykola YAROSHEVYCH** (Ukraine)

Д-р техн. наук, проф.

[ORCID: 0000-0002-2436-5608](https://orcid.org/0000-0002-2436-5608)

Dr. Sci. (Tech.), Prof.

Юрій ЛАПЧЕНКО (Україна)**Yurii LAPCHENKO** (Ukraine)

Канд. техн. наук, доц.

[ORCID: 0000-0001-7374-4770](https://orcid.org/0000-0001-7374-4770)

PhD, Ass. Prof.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-01>
УДК 681.121:006.91

Денисюк В. Ю.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0001-9268-5489
Лапченко Ю. С.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0001-7374-4770

Луцький національний
технічний університет / Україна

МЕТОДИКА ПОВІРКИ ПОКРАЩЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧНИХ ДАТЧИКІВ РІВНЯ

Анотація: у статті описано вимірювання рівня рідини при автоматизації технологічних процесів у багатьох галузях промисловості. Ці вимірювання особливо важливі в таких випадках, коли підтримання заданого рівня рідин, пов'язано з умовами безпечної роботи обладнання. На сьогодні існує велике число методів вимірювання рівня рідин та сипучих речовин. Вимірювання рівня відбувається як у відкритих резервуарах, так і в ємностях, що знаходяться під тиском. Принцип дії акустичних та ультразвукових рівнемірів базується на вимірі часу проходження імпульсу ультразвуку від випромінювача до поверхні рідини та назад. Розроблено та описано методику покращення метрологічних характеристик акустичного датчика рівня ЕХО шляхом підвищення роздільної здатності датчика рівня.

Ключові слова: ультразвукове випромінювання, датчик рівня, випробування, акустичний перетворювач, автоматизована система керування, перетворення Фур'є, систематична похибка, повірка.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ультразвукове випромінювання знайшло широке використання у різних областях науки і техніки, у тому числі для контролю різноманітних технологічних параметрів, у дефектоскопії, для побудови неінвазивних засобів лікування тощо. Ультразвуковий сигнал (УЗС) випромінюється відповідним ультразвуковим випромінювачем (УЗВ) і направляється на досліджуваний об'єкт. Після перетворення УЗС повертається в ультразвуковий приймач (УЗП). На шляху свого проходження УЗС може декілька разів перетворюватися в різну форму. Кожний такий перехід є реологічним. В ультразвукових засобах контролю рідин використовуються, як правило, п'єзоелектричні (в основному п'єзокерамічні) елементи, які призначені для створення ультразвукових коливань (УЗК) при дії на них електричного збуджуючого імпульсу. Під дією електродинамічного зусилля п'єзоелектричний елемент, який має форму пластини круглої форми, деформується подібно металевій мембрані, яка жорстко закріплена за периметром. Після припинення дії електродинамічного зусилля УЗВ здійснює вільні механічні коливання, частота яких знаходиться в ультразвуковому

діапазоні. З іншої сторони, механічні коливання наводять в УЗВ електрорушійну силу з частотою тих же коливань, яка створює електродинамічне зусилля, котре направлено протилежно до напрямку руху УЗВ, створюючи гальмуючу дію. За рахунок цього загасання коливань УЗВ здійснюється швидше, що приводить до формування короткого ультразвукового імпульсу у формі інтегральної δ -функції Дірака. Виходячи зі сказаного в УЗВ протікають електромагнітні процеси, які супроводжуються перетвореннями електричної енергії в механічну та навпаки.

Вимірювання рівня рідини відіграє важливу роль при автоматизації технологічних процесів у багатьох галузях промисловості. Ці виміри особливо важливі в таких випадках, коли підтримання заданого рівня рідин, пов'язано з умовами безпечної роботи обладнання. На сьогодні існує велике число методів вимірювання рівня рідин та сипучих речовин. Вимірювання рівня відбувається як у відкритих резервуарах, так і в ємностях, що знаходяться під тиском. Принцип дії акустичних та ультразвукових рівнемірів базується на вимірі часу проходження імпульсу ультразвука від випромінювача до поверхні рідини та назад. При прийомі відбитого імпульсу випромінювач стає датчиком. Якщо випромінювач розташований над рідиною, рівнемір називається акустичним; якщо усередині рідини – ультразвуковим. У першому випадку час, який вимірюється, буде тим більше, чим нижче рівень рідини H , у другому – навпаки. Електронний блок призначений для формування ультразвукових імпульсів, посилення відбитих імпульсів, вимірювання часу проходження імпульсом подвійного шляху (у повітрі або рідині) і перетворення цього часу в уніфікований електричний сигнал. Наприклад, акустичний рівнемір ЭХО-1 використовується для виміру рівня неоднорідних рідин (із перемінною за висотою щільністю), які кристалізуються і випадають в осад, у баках висотою до 3 м і має вихідний сигнал у виді постійного струму. До безперечних переваг використання акустичних показників рівня рідини відносяться: безконтактна можливість використання в забрудненому середовищі, а також у різного виду рідинах, відсутність високих вимог до зносостійкості і міцності обладнання, незалежність від щільності рідини. Але є й недоліки, на які варто звернути увагу: велика розбіжність конуса випромінювання, можливість виникнення помилок вимірювання при відбитті від нестаціонарних перешкод, може використовуватися тільки в резервуарах з нормальним атмосферним тиском.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Засоби вимірювання рівня застосовуються у всіх галузях промисловості та сільського господарства для вимірювання, контролю та регулювання параметрів технологічних процесів, випробування машин, обладнання та різної апаратури при кількісному обліку. Частка вимірювань рівня рідини від загального обсягу вимірів у промисловості становить близько 10 % [1]. Незважаючи на велику кількість методів вимірювання цих параметрів, потреба у високоточних датчиках надзвичайно велика і, очевидно, зростатиме у міру розвитку виробництва. Підвищення точності і забезпечення єдності вимірів належить до актуальних завдань метрології. Одночасно, високоточне

вимірювання цих параметрів необхідне економічної звітності та економії всіх видів ресурсів.

Найбільш перспективні ультразвукові рівнеміри, придатні для вимірювання рівня рідких та сипких матеріалів, желеподібних та двофазних продуктів та зріджених газів. Вони працюють в агресивних, вибухо- та пожежонебезпечних умовах, у широкому діапазоні температур та тисків [2, 3]. Незважаючи на широке поширення ультразвукових рівнемірів, їх потенційні можливості до кінця не реалізовані. Основні напрями вдосконалення – схемотехніка апаратної частини, нові алгоритми обробки сигналу та розширення функціональних можливостей рівнемірів.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Методика покращення метрологічних характеристик датчика полягає в підвищенні роздільної здатності датчика, що забезпечується тим, що чутливий елемент підключено до хвилеводу і закінчується двома відрізками довжиною l , розташованими під кутом $n/2$ до напрямку сили тяжіння, і розташований в площині, розміщеної під кутом α до напрямку сили тяжіння, причому кут α лежить в межах $0 < \alpha < \pi/2$.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Датчики рівня акустичні типу ЕХО призначені для безперервного дистанційного вимірювання рівня:

- рідких середовищ, в тому числі в'язких, неоднорідних, що випадають в осад, вибухонебезпечних, високоагресивних тощо, при температурі вимірюваного середовища від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску до 4,0 МПа;

- сипучих і шматкових матеріалів з розмірами гранул до 300 мм при температурі вимірюваного середовища від $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При проведенні перевірки повинні бути виконані наступні операції:

- зовнішній огляд датчика;
- випробування датчика;
- визначення основної приведеної похибки;
- визначення варіації вихідного сигналу датчика.

При проведенні перевірки повинні бути застосовані такі засоби:

- установка повірочна рівнемірна імітаційна типу УПУ-35І ТУ25-02.020258-83;

- термометр ртутний з межами вимірювання від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- психрометр аспіраційний з межами вимірювання відносної вологості від 10 до 100%;

- барометр з межами вимірювання тиску від 610 до 900 мм. рт. ст. за ТУ 912-500-ТУ1.

Всі засоби перевірки повинні бути повірені (атестовані) органами метрологічної служби і мати чинні свідоцтва про перевірку або відбитки повірочного тавра.

Перевірка повинна проводитися в заводських, випробувальних та інших лабораторіях (приміщеннях), де повинні бути дотримані наступні умови:

- температура навколишнього повітря – $20 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$;

- атмосферний тиск – 84-106,4 кПа;
- відносна вологість – 30-80 %;
- зміна температури протягом повірки – не більше 0,5 °С;
- живлення здійснюється від мережі змінного струму напругою – $220 \pm 4,4$ В і частотою – 50 Гц;
- опір зовнішнього навантаження в ланцюзі вихідного сигналу – не більше 200 Ом;
- відсутність вібрації, джерел електричних і магнітних (крім зеленого) полів.

При заміні термоопору в акустичному перетворювачі датчика, що повіряється на еталоний опір, номінальне значення якого дорівнює значенню термоопору при 20 °С, допускається проводити повірку при температурі навколишнього повітря (20 ± 5) °С.

Перед проведенням повірки повинні бути виконані наступні підготовчі роботи:

- необхідно ознайомитися з правилами техніки безпеки і роботи з електроустановками;
- підключити датчик і установку згідно з рисунком 1, заземлити їх корпус і витримати у включеному стані не менше 30 хв. Випромінюючу поверхню акустичного перетворювача повіреного датчика заглушити паролоном.

При проведенні зовнішнього огляду повинно бути встановлено відповідність датчика, що повіряється вимогам технічної документації в частині комплектності, маркування та зовнішнього вигляду. Випробуванням повинно бути встановлено загальне функціонування датчика (надходження сигналів від будь-якої відбиваючої поверхні) і його роботоздатністю згідно з відповідним розділом технічного опису або паспорта на датчик.

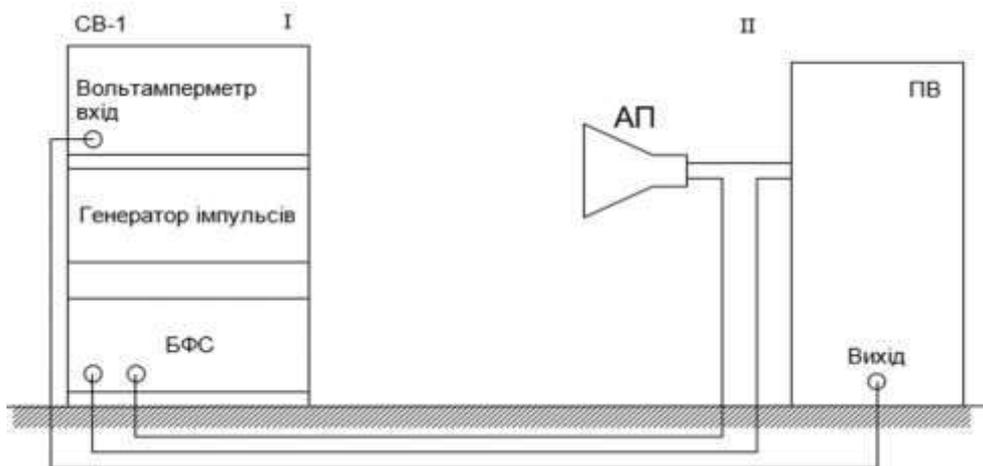


Рисунок 1 – Структурна схема з'єднань засобів повірки датчиків рівня акустичних типу ЕХО: I – установка повірочна рівнемірна імітаційна типу УПУ-35I; СВ-I – стійка вимірювання, що включає в себе вольтамперметр, генератор імпульсів, блок формування сигналів БФС; II – датчик рівня акустичний типу ЕХО, що повіряється; АП – акустичний перетворювач; ПВ – перетворювач вимірювальний

Визначення основної приведенної похибки датчика виконується на установці УПУ-35І. Імітація вимірюваного рівня датчика виконується за допомогою електронного блоку фіксованим значенням тимчасової затримки зондуючого сигналу в вимірювальному тракті установки.

Перевірити правильність розташування ручок генератора Г5-60 установки УПУ-35І. Положення ручок має бути наступним: запуск – П, період Т-000000; часове зрушення – Д2-000000; тривалість – 0; режим роботи – 2, П, амплітуда 10 В.

Вибрати градуювальну таблицю, що відповідає типу датчика, що повіряється з певним діапазоном вимірюваного рівня. За обраною градуювальною таблицею на генераторі Г5-60 виставити одне з контрольних значень величини тимчасової затримки $t_{зад}$. відповідне значення 0, 30, 50, 75 і 100 % від верхньої межі діапазону вимірюваного рівня датчика, що повіряється і зробити відлік показів вихідного сигналу вольтамперметри установки УПУ-35І.

Основна приведена похибка датчика визначається як різниця між фактичним значенням вихідного сигналу J_i і розрахунковим значенням цього сигналу J_p , віднесена до діапазону зміни вихідного сигналу $J_{max}-J_0$ і визначається в %.

Для діапазонів 0-5,0 і 0-20,0 мА похибка обчислюється за формулою (1):

$$J_i = \frac{J_i - J_p}{J_{max}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Для діапазонів 4,0-20,0 мА похибка обчислюється за формулою (2):

$$J_i = \frac{J_i - J_p}{J_{max} - 4} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де J_i (мА) – значення вихідного сигналу датчика, виміряного вольт-амперметра;

J_p (мА) – розрахункове значення вихідного сигналу, що відповідає $t_{зад}$ з градуювальної таблиці;

J_{max} (мА) – максимальне значення вихідного сигналу, що відповідає верхній межі діапазону вимірюваного рівня датчика, що повіряється;

i – число вимірювань.

Кількість вимірювань в кожній з п'яти зазначених вище контрольних точок повинно бути не менше трьох.

Максимальне значення величини J_i приймається за основну приведену похибку вимірювання рівня і не повинно перевищувати 0,75 абсолютного значення нормованої похибки датчика, що повіряється.

Визначення основної похибки датчика допускається проводити за допомогою щита-відбивача (рис. 2), що імітує положення контрольованого рівня.

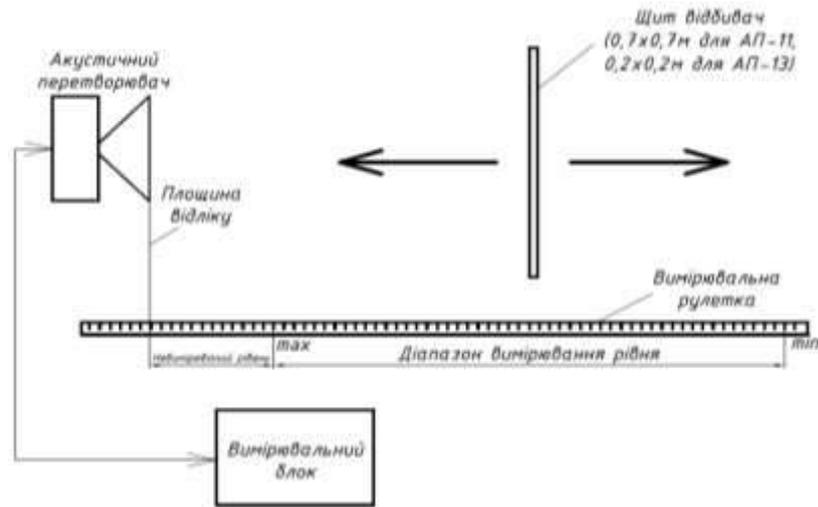


Рисунок 2 – Ескіз установки випробування датчика рівня

При цьому необхідні:

– атестована рулетка або лінійка не менше величини відстані, що дорівнює сумі невимірюваного рівня і діапазону вимірювання рівня датчика, який починається від площини відліку АП. Похибка рулетки повинна бути не більше 0,002 м;

– щит з відбиває звук матеріалу розміром не менше 0,5×0,5 м.

За градуювальною таблицею встановити щит на відстань від АП, відповідному 0, 30, 50, 75 і 100 % від верхньої межі діапазону вимірювання рівня. Щит повинен бути встановлений так, щоб його площина і геометрична вісь АП були взаємно перпендикулярні. Точність установки щита контролюється рулеткою.

Визначення варіації вихідного сигналу проводиться при зміні величини тимчасової затримки в бік її збільшення або зменшення в межах контрольної точки діапазону вимірюваного рівня датчика, що перевіряється.

Датчик вважається таким, що витримав випробування і не перевищує 0,75 абсолютного значення межі основної приведенної похибки вивіреного датчика, якщо варіація В вихідного сигналу, що визначається виразом (3):

$$B = \frac{J_1 - J_2}{J_{\max}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де J_1 і J_2 – значення вихідних сигналів відповідно при збільшенні і зменшенні тривалості тимчасової затримки.

Кількість вимірювань в кожній точці має бути не менше трьох.

Градуювальні таблиці акустичних перетворювачів представлено на рисунку 3.

Діапазон вимірювання, м 0..40
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-11
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	41836	0	0	4
12	30	31361	1.5	6	8.8
20	50	24344	2.5	10	12
30	75	15597	3.75	15	16
40	100	6651	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..0.6
Невимірюваний рівень, м 0.25
Акустичний перетворювач АП-13
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	2027	0	0	4
0.18	30	1582	1.5	6	8.8
0.3	50	1735	2.5	10	12
0.45	75	1589	3.75	15	16
0.6	100	1444	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..20
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-31
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	9121	0	0	4
6	30	8422	1.5	6	8.8
10	50	7955	2.5	10	12
15	75	7372	3.75	15	16
20	100	6789	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..20
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-8
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	12620	0	0	4
6	30	10871	1.5	6	8.8
10	50	9704	2.5	10	12
15	75	8247	3.75	15	16
20	100	6789	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..20
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-61
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	9471	0	0	4
6	30	8422	1.5	6	8.8
10	50	7722	2.5	10	12
15	75	6847	3.75	15	16
20	100	5973	5	20	20

Діапазон вимірювання, м 0..40
Невимірюваний рівень, м 1
Акустичний перетворювач АП-11
Швидкість звуку, м/с 343

Рівень		Час затримки, мс	Розрахункове значення вихідного сигналу, мА		
м	%		0..5	0..20	4..20
0	0	8305	0	0	4
6	30	7606	1.5	6	8.8
10	50	7139	2.5	10	12
15	75	6556	3.75	15	16
20	100	5973	5	20	20

Рисунок 3 – Градувальні таблиці акустичних перетворювачів

Позитивні результати перевірки слід оформляти свідоцтвом перевірки, а в паспорті приладу виконується запис результатів перевірки і ставиться дата і підпис особи, яка проводила перевірку, скріплена відбитком повірочного тавра.

При негативних результатах перевірки датчик до застосування не допускається. У паспорті (або документі його замінює) здійснюється запис про непридатність датчика, а повірочного тавра годиться.

За результатами перевірки складається протокол запису результатів перевірки за відповідною формою.

Методика покращення метрологічних характеристик датчика.

Технічний результат полягає в підвищенні роздільної здатності датчика, що забезпечується тим, що чутливий елемент підключено до хвилеводу і закінчується двома відрізками довжиною l , розташованими під кутом $\pi/2$ до напрямку сили тяжіння, і розташований в площині, розміщеної під кутом α до напрямку сили тяжіння, причому кут α лежить в межах $0 < \alpha < \pi/2$.

Досягнення технічного результату, що полягає в підвищенні роздільної здатності, забезпечується тим, що датчик має дві опорні точки чутливого елемента. Такими точками є відрізки довжиною l , розташовані під кутом $\pi/2$ до напрямку сили тяжіння. Завдяки проходженню акустичного сигналу від цих відрізків до приймача вдається чітко зафіксувати моменти взаємодії середовища з чутливим елементом, причому в межах між відрізками вдається побудувати залежність амплітуди сигналу від густини середовища (рівня) i , відповідно, визначити рівень у межах між відрізками чутливого елемента. Довжини відрізків не повинні перевищувати довжини чутливого елемента i , як правило, вибираються з конструктивно розміщених під кутом α до напрямку сили тяжіння, що переслідує ту ж мету – підвищення роздільної здатності. При $\alpha=0$ маємо максимальну роздільну здатність, у разі $\alpha=\pi/2$ роздільна здатність мінімальна – рівень фіксується в точці (площині) [5].

На рисунку 4 показаний один елемент акустичного датчика рівня. Датчик складається з генератора 1, що подає радіоімпульси на п'єзоелемент 3, який випромінює акустичну енергію. Хвилевід 4, передає акустичний сигнал на чутливий елемент 5. Вторинна апаратура 2 включає перетворювач акустичних сигналів, АЦП (аналого-цифровий перетворювач), персональний комп'ютер ПК тощо.

Датчик працює наступним чином. При подачі на п'єзоелемент електричного радіоімпульсу акустичний сигнал по хвилеводу досягає чутливого елемента роздвоюється, проходить через плечі чутливого елемента, відбивається від місця приєднання хвилеводу до чутливого елемента від його вільних кінців – відрізків довжиною l (можливе виконання чутливого елемента у вигляді замкнутого контуру). Далі сигнал надходить на приймальну апаратуру і відповідним чином обробляється.

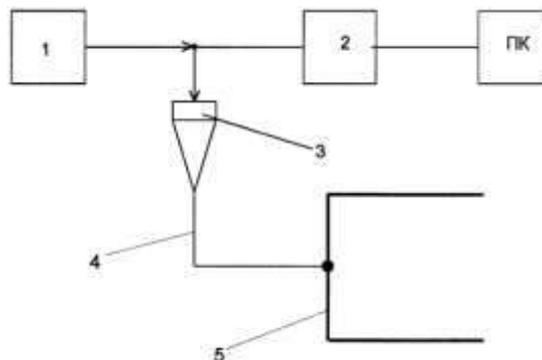


Рисунок 4 – Елемент акустичного датчика рівня: 1 – генератор; 2 – вторинна апаратура; 3 – п'єзоелемент; 4 – хвилевід; 5 – чутливий елемент

На рисунку 5 показана якісна залежність амплітуд з рідиною. Далі показано зміну амплітуди сигналу при подальшому підйомі рідини аж до повного затоплення другого плеча датчика рідиною (1/2).

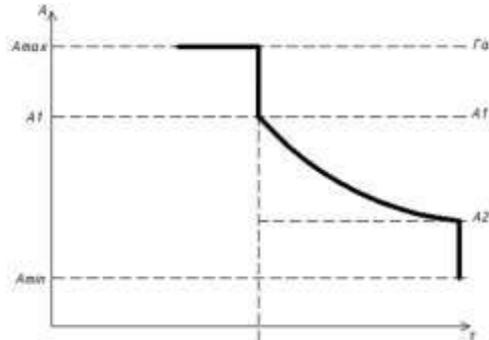


Рисунок 5 – Залежність амплітуд з рідиною

Як видно з рисунка 5, амплітуда змінюється від максимального значення A_{max} , відповідного знаходженню чутливого елемента в газі, до значення A_1 і A_2 , коли одне плече датчика стикається з газом A_1 і, відповідно, друге плече стикається з рідиною A_2 . Як видно, датчик дозволяє не тільки точно зафіксувати дискретні значення рівня (при значеннях амплітуд A_1 і A_2 але і визначити його проміжні значення, коли значення амплітуд лежать в інтервалі A_1 і A_2 .

В якості прикладу розглянуто роботу рівнеміра в умовах: високих температур і тисків. Рівнемір (рис. 6), встановлюється в стендовий компенсатор об'єму. Рівнемір містить кілька (n_1, n_2, n_3, n_4) елементів, що включають хвилевід, чутливий елемент і випромінювач. Відстань між відрізками l становить 0,5 м, що дозволяє контролювати дискретно рівень у 8-ми точках і мати практично лінійний розподіл сигналу в проміжних точках (між відрізками 1).

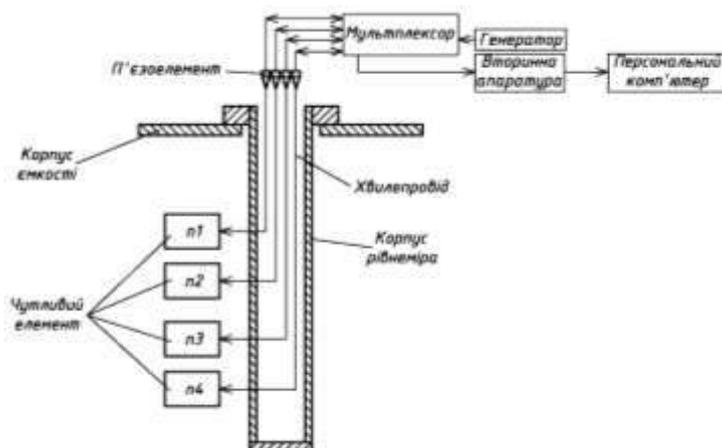


Рисунок 6 – Рівнемір в умовах високих температур і тисків

На рисунку 7 показано зміну рівня при дискретних точках, так і отримання значення рівня в проміжних точках.

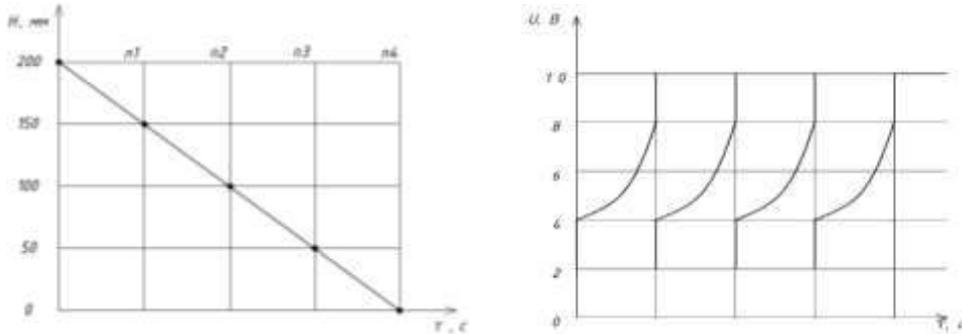


Рисунок 7 – Зміна рівня при дискретних точках: H – рівень рідини в компенсаторі об'єму; U – вихідний сигнал; t – час

Таким чином, запропоноване технічне рішення дозволяє збільшити роздільну здатність вимірювання рівня, в тому числі і в динамічних режимах.

Акустичний датчик рівня, що містить генератор імпульсів, підключений до випромінюючого п'єзоелементу, хвилевід, чутливий елемент і вторинну апаратуру, відрізняється тим, що вторинна апаратура включає перетворювач акустичних сигналів, аналого-цифровий перетворювач, персональний комп'ютер, а чутливий елемент підключено до хвилеводу і закінчується двома відрізками довжиною l , розташованими під кутом $\pi/2$ до напрямку сили тяжіння, і розташований в площині, розміщеної під кутом α до напрямку сили тяжіння, причому кут α лежить в межах $0 \leq \alpha \leq \pi/2$.

Технічним результатом є підвищення точності вимірювання рівня рідини у резервуарах з просторово неоднорідним розподілом температури і/або газового складу, вільної від рідини порожнини, спрощення конструкції.

Технічний результат досягається тим, що резонансний акустичний рівнемір, що містить вимірювальну трубу, електроакустичний перетворювач і мікрофон, встановлені у верхній частині труби, до виходу мікрофона послідовно підключений попередній підсилювач, вихід попереднього підсилювача з'єднаний з процесором, у якому послідовно з'єднані аналого-цифровий перетворювач, блок першого перетворення Фур'є, блок логарифмування, блок другого перетворення Фур'є, процесор забезпечений послідовно з'єднаними блоком обчислення рівня рідини і індикатором, рівнемір виконаний однорезонаторним, блок виділення максимумів спектра і блок селекції для фіксації не більше трьох виділених спектральних максимумів з найбільшими часом, причому вихід генератора фазоманіпуляційного сигналу з'єднаний зі входом електроакустичного перетворювача, а послідовно з'єднані блок виділення максимумів спектра і блок селекції підключені між блоком другого перетворення Фур'є і блоком обчислення рівня рідини. Процесор виконаний у вигляді мікропроцесорного блоку зі світлодіодним або рідкокристалічним індикатором. Генератор

фазоманіпуляційного сигналу виконаний у вигляді генератора лінійно-частотно-модульованого сигналу.

Структурна схема резонансного акустичного рівнеміра представлена на рисунку 8, де блок виділення максимумів підключений до виходу генератора. Вихід мікрофона підключений до входу попереднього підсилювача, до виходу якого приєднаний вхід аналого-цифрового перетворювача. До виходу аналого-цифрового перетворювача послідовно підключені блок першого перетворення Фур'є, блок логарифмування, блок другого перетворення Фур'є, блок виділення максимумів функції спектра, блок селекції, блок обчислення рівня, індикатор.

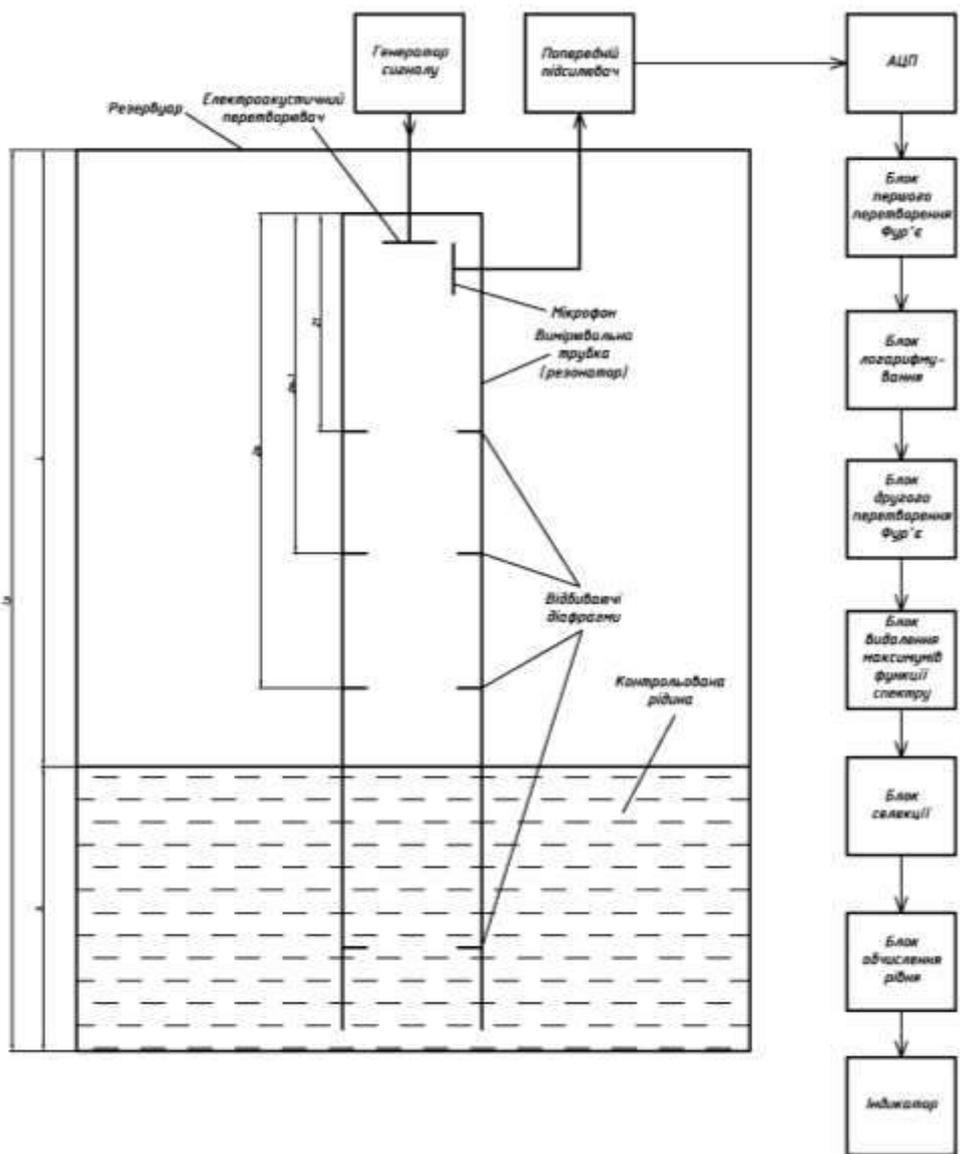


Рисунок 8 – Структурна схема резонансного акустичного рівнеміра

Резонансний акустичний рівнемір працює наступним чином.

Широкопasmовий фазоманіпульований сигнал постійної амплітуди, випромінюваний електроакустичним перетворювачем, збуджує стоячі акустичні хвилі (резонанси) на власних частотах вимірювальної труби (резонатора) (4):

$$f_L = c_L/2L \text{ та } f_m = c_m/2z_m, \quad (4)$$

де m – номер діафрагми;

L – відстань від перетворювача до поверхні рідини;

z_m – відстань від перетворювача до відбиваючої діафрагми з номером m ;

c_L, c_m – середні значення швидкості звуку на відрізках L і z_m відповідно.

Стоячі хвилі збуджують тільки ті відображають діафрагми, які знаходяться вище рівня рідини. На виході блоку другого перетворення Фур'є формується функція кепстру (5) з максимумами на значеннях кепстрального часу:

$$f_L = 1/t_L, \quad f_m = 1/t_m. \quad (5)$$

Ці значення з виходу блоку селекції надходять в блок обчислення. Якщо над поверхнею рідини знаходиться тільки одна відбиваюча діафрагма, то рівень рідини обчислюється обчислювальним блоком згідно з формулою (6):

$$h = L_p - z_1 t_1 / t_1, \quad (6)$$

де L_p – відстань від перетворювача до дна резервуара або позначки, прийнятої за нульовий рівень.

Невідома швидкість звуку в газовій порожнині труби в цей вираз не входить, і, відповідно, при її зміні точність вимірювання рівня рідини не знижується.

Якщо над поверхнею рідини виявляються дві або більше відображаючі діафрагми, то рівень рідини визначається обчислювальним блоком за значенням часу, що відповідає двом останнім незануреним в рідину діафрагмам, згідно з формулою (7):

$$h = L_p - z_m - \frac{t_L - t_m}{t_m - t_{m-1}} (z - z_{m-1}). \quad (7)$$

При оцінці рівня рідини за цією формулою знижується систематична похибка, що виникає при зміні швидкості звуку по довжині газової порожнини труби. Систематична похибка знижується завдяки як зменшенню інтервалу часу, що перераховується на відстань ($t_L = t_m$ замість t_L), так і підвищенню точності вимірювання швидкості звуку у вимірювальній трубі за рахунок

використання для цього сигналів від двох найближчих до рідини відбивних діафрагм.

Попередній підсилювач служить для підсилення сигналу, прийнятого мікрофоном, і придушення перешкод за межами робочого діапазону частот. Низький вихідний опір попереднього підсилювача дозволяє передавати сигнал по протяжній кабельній лінії і розміщувати блок аналого-цифрового перетворювача, блок першого перетворення Фур'є, блок логарифмування, блок другого перетворення Фур'є, блок виділення максимумів функції спектра, блок селекції, блок обчислення рівня та індикатор на значній відстані від контрольованого резервуара. Блоки електроакустичного перетворювача, генератора фазоманіпуляційного сигналу, мікрофона, попереднього підсилювача, розміщуються в оболонці (не показана), що кріпиться до верхньої частини вимірювальної труби.

Натурні випробування зразків однорезонаторного акустичного рівнеміра підтверджують високу точність вимірювань рівня рідини: при зміні рівня рідини до 10 м похибка його вимірювання не перевищує 1 мм.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Позитивні результати перевірки слід оформляти свідоцтвом перевірки, а в паспорті приладу виконується запис результатів перевірки і ставиться дата і підпис особи, яка проводила перевірку, скріплена відбитком повірочного тавра.

При негативних результатах перевірки датчик до застосування не допускається. У паспорті (або документі його замінює) здійснюється запис про непридатність датчика, а повірочного тавра годиться.

За результатами перевірки складається протокол запису результатів перевірки за відповідною формою.

ВИСНОВКИ

Попередній підсилювач служить для підсилення сигналу, прийнятого мікрофоном, і придушення перешкод за межами робочого діапазону частот. Низький вихідний опір попереднього підсилювача дозволяє передавати сигнал по протяжній кабельній лінії і розміщувати блок аналого-цифрового перетворювача, блок першого перетворення Фур'є, блок логарифмування, блок другого перетворення Фур'є, блок виділення максимумів функції спектра, блок селекції, блок обчислення рівня та індикатор на значній відстані від контрольованого резервуара. Блоки електроакустичного перетворювача, генератора фазоманіпуляційного сигналу, мікрофона, попереднього підсилювача, розміщуються в оболонці (не показана), що кріпиться до верхньої частини вимірювальної труби.

Натурні випробування зразків однорезонаторного акустичного рівнеміра підтверджують високу точність вимірювань рівня рідини: при зміні рівня рідини до 10 м похибка його вимірювання не перевищує 1 мм.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Андросова В. Г., Броннікова Є. Г., Васильєв Є. Г. П'єзоелектричні резонатори : Довідник. Київ : Радіо і зв'язок, 2010. 392 с.

- [2] Бакаленко В. І., Оробей . О. І, Хроль В. Н. , Василенко А. А. Корекція температурної похибки акустичних рівнемірів. *Вимірювальна техніка*. 2015. №5. С. 32-36.
- [3] Бергман Л. Ультразвук та його застосування в науці та техніці. Переклад / М. В. Григор'єв, Л. Д. Розенберг. Київ : Вид-во іноземної літератури, 2013. 726 с.
- [4] Гриньова Л. Д., Слесарева Л. М., Молчанова Р. А. Матеріали та датчики для ультразвукових витратомірів. *Вимірювальна техніка*. 2007. № 7. С. 24-30.
- [5] Гусинський І. С. Малі АСУТП вимірювання рівня рідких та сипких матеріалів. *Прилади та системи управління*. 2008. № 8. С. 21-25.

METHOD OF VERIFICATION OF IMPROVEMENT THE METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC LEVEL SENSORS

Denysiuk V. PhD, Associate Professor
Lapchenko Y. PhD, Associate Professor
Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. The article describes the measurement of liquid levels in the automation of technological processes in many industries. These measurements are especially important in cases where maintaining a given level of liquids is associated with the conditions of safe operation of the equipment. Today, there are a large number of methods for measuring the level of liquids and bulk solids. Level measurement occurs both in open tanks and in pressurized containers. The principle of operation of acoustic and ultrasonic level meters is based on measuring the time of passage of an ultrasound pulse from the emitter to the surface of the liquid and back. A method for improving the metrological characteristics of the acoustic level sensor ECHO by increasing the resolution of the level sensor has been developed and described.

Keywords: ultrasonic radiation, level sensor, testing, acoustic transducer, automated control system, Fourier transform, systematic error, verification.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
16.03.2025 р.	27.04.2025 р.	21.06.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-02>
UDK 004.896

Lynnyk Y.
Associate Professor
ORCID: 0000-0002-3084-0401

Lesya Ukrainka Volyn National
University / Ukraine

EVALUATION AND OPTIMIZATION OF WEBSITE EFFICIENCY USING GOOGLE PAGESPEED INSIGHTS

Abstract. *The article explores the specifics of determining website efficiency using the Google PageSpeed Insights tool. The main criteria for webpage efficiency are considered, including loading speed, interactivity, and stability of content display. An analysis of existing approaches to website performance evaluation is conducted, and the expediency of using Google PageSpeed Insights for their optimization is substantiated. The practical part of the study focuses on evaluating the efficiency of the website of Lesya Ukrainka Volyn National University, which allowed identifying key shortcomings and formulating recommendations for their elimination. The theoretical significance of the work lies in clarifying the concept of «website efficiency» and analyzing methods for its evaluation. The practical value of the research lies in developing recommendations for improving the performance of web resources.*

Keywords: *website efficiency or website effectiveness, Google PageSpeed Insights, optimization, loading speed or page load speed, performance, web technologies.*

INTRODUCTION, PROBLEM STATEMENT

More and more aspects of life are transitioning into the realm of web technologies, which attract people due to their accessibility, popularity, and convenience. Web technologies enable interaction across various fields with minimal effort. In today's world, it is nearly impossible to imagine the functioning of science, business, education, and everyday life without the Internet. That is why websites have become powerful tools for engaging with target audiences. As a result, a web page must be efficient. Efficiency involves minimizing the overall page load time, ensuring smooth loading, and maintaining interactivity.

It should be noted that the need to study the functioning of web technologies became relevant with the advent of the Internet. The Internet drew attention from people across different sectors, leading to numerous studies that contributed to the broad development of web technologies. People began to create and explore different principles of website operation. In particular, the fundamental theoretical principles of web page functionality, structure, and efficiency were substantiated by researcher D. Palmer. Comparative studies on measuring website efficiency were conducted by D. Lee, A. Morrison, and R. Welling. The work of S. Souders, who introduced the world to High-Performance Web Sites, is also noteworthy.

A comprehensive study of website efficiency and its tools is an important task for every website owner or developer. Thus, the practical importance of evaluating website efficiency and its impact on a site's search engine ranking determined the choice of our research topic: «Features of Website Efficiency Assessment Using Google PageSpeed Insights».

Problem Statement: The subject of this study is the evaluation and optimization of the website efficiency of Lesya Ukrainka Volyn National University.

The aim of the research is to identify the criteria for website efficiency, assess the website's performance using Google PageSpeed Insights, and develop recommendations for its optimization. Achieving this aim involves solving the following tasks:

- justify the concept of «website efficiency» and analyze the tools used for its assessment;
- substantiate the specific features of using the Google PageSpeed Insights tool for evaluating website performance;
- identify the main criteria for webpage efficiency;
- conduct an analysis and formulate recommendations for improving website efficiency.

The theoretical significance of this study lies in clarifying the concept of website efficiency, analyzing the main tools for assessing web performance, and identifying the key efficiency criteria for websites. The practical significance of the research is that it involves evaluating the efficiency of the Lesya Ukrainka Volyn National University website and developing recommendations for its optimization.

ANALYSIS OF AVAILABLE RESEARCH AND PUBLICATIONS

Today's world, it is impossible to do without an online presence aimed at expanding the client base and promoting a business, product, or service. A website has become a powerful tool for interacting with the target audience. A website is defined as a collection of webpages available on the Internet, unified by content and navigation under a single domain name [1]. Clearly, any website should be informative, visually appealing, and efficient.

Website efficiency refers to how quickly a website loads and how it is displayed during the loading process [2]. If a website performs poorly, the landing page will load slowly, leading to a low-quality user experience. Since the concept of website efficiency is complex, researchers divide it into several key components: total load time reduction, lazy loading, smoothness and interactivity, perceived performance, and performance score.

The analysis of the first component-reducing overall load time-helps understand the general strategy of minimizing file sizes, reducing the number of HTTP requests, and applying smart loading techniques.

The second component, lazy loading, means that additional resources can continue loading in the background while the user performs primary tasks. Sometimes, resources are loaded only when they are truly needed.

The third component, smoothness and interactivity, refers to the use of practices that ensure a seamless experience, such as using CSS animations

instead of JavaScript and minimizing re-rendering of the user interface caused by changes in the DOM.

The fourth component, perceived performance, is about how fast the website feels to the user, which can have a greater impact on user engagement than the actual speed of the page. Even if an operation takes time, the user can stay engaged by showing a loading spinner or helpful tips while they wait.

The fifth component, the performance score, involves identifying actual and expected application speed, applying optimizations where possible, and continuously monitoring performance to ensure that improvements remain effective over time [3].

As previously mentioned, website efficiency can be measured and evaluated using specific tools. It is appropriate to examine some of these tools in more detail.

Lighthouse is a free, open-source tool for testing website performance (fig. 1).

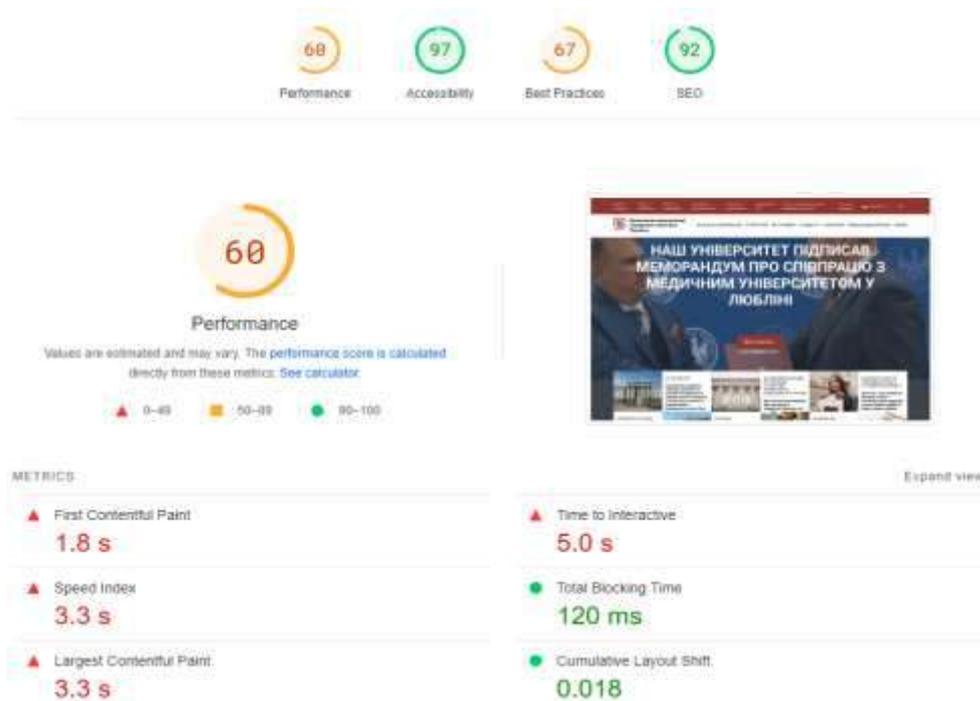


Figure 1 – General View of the Generated Lighthouse Report

It can provide personalized recommendations for optimizing website performance, accessibility, and search engine optimization. You can work with Lighthouse in Chrome DevTools, from the command line, as a Chrome extension, or as a Node.js module. All you need to do is enter the URL into Lighthouse, and it will run a series of audits based on lab data, then generate a report showing how well the web page performed and how it can be improved [4].

WebPageTest (WPT) is another open-source tool that can be used to measure website performance (fig. 2), check Core Web Vitals, generate a Lighthouse report,

compare the performance of one or more pages, dive into detailed statistics, and test functionality on a real device.

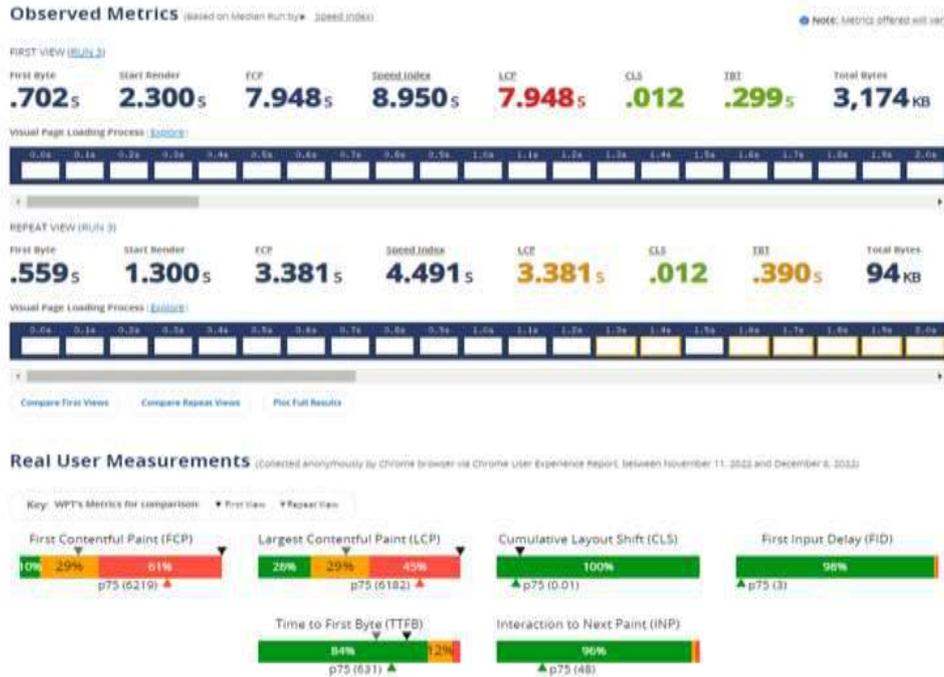


Figure 2 – General View of the Generated WebPageTest Report

Its system uses its own testing environment, Lighthouse [5] and Core Web Vitals, and runs tests using a URL. It generates a report that highlights key issues and offers recommendations for improving the website. Additionally, WebPageTest (WPT) can compare the performance of multiple pages and display average results [6].

GTmetrix is a reliable tool used to obtain a detailed report and assess website performance (fig. 3). Its main advantages include the ability to view the total page load time, identify major issues that need to be resolved, and detect resources that place the highest load on the server.

For example, GTmetrix can identify that the main issue to address on a website is avoiding excessive network loads. It can provide a complete list of URLs on the page that need fixing [7].

PageSpeed Insights (PSI) is a free tool that helps find and fix problems slowing down a website. It can recommend compressing images to reduce file load times, reducing the amount of unused JavaScript code, showing which scripts impact page load times, and much more. Currently, PSI holds a leading position among performance evaluation tools because it uses real user data from Google in its reports and incorporates the Lighthouse tool in its system, which generates a separate report for a more detailed analysis [8].

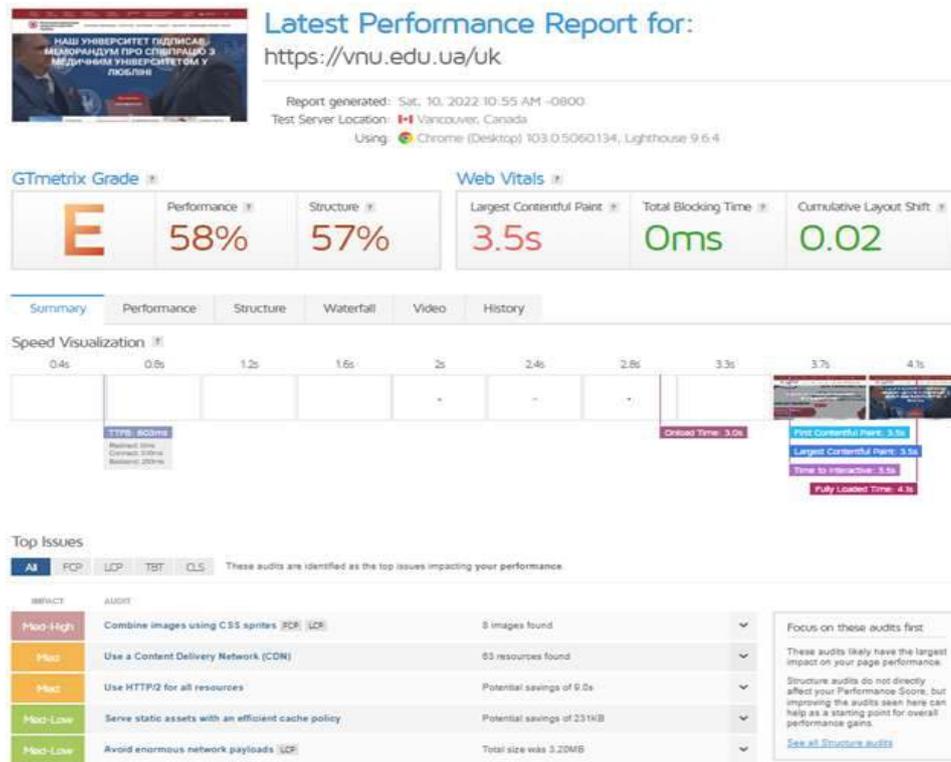


Figure 3 – General View of the Generated GTmetrix Report

PURPOSE OF THE ARTICLE

Based on the above, we can conclude that PageSpeed Insights is one of the most popular tools for assessing website performance. Additionally, it is worth noting that the metrics provided by this service strongly correlate with a site's ranking in Google's search results. Therefore, we consider it appropriate to conduct a more detailed analysis of this tool and its performance evaluation system in the following subsection.

MAIN ARTICLE

Google PageSpeed Insights Tool. The leading tool PageSpeed Insights (PSI) uses various measurement technologies, including the Lighthouse tool, which collects and analyzes lab data combined with real-world data from the Chrome User Experience Report (CrUX) [9]. The result is a score summarizing website performance and a set of optimization recommendations.

PSI allows switching between desktop and mobile versions of the report, which is useful for optimizing user experience on different devices. It is important to note that the metrics and scores may differ between these versions: a desktop site may be more optimized than its mobile version or vice versa. Therefore, analyzing webpages should be done separately for each platform [10].

The PSI architecture relies on the CrUX dataset, which gathers real user experience metrics from Chrome users during their browsing activity. This data is

publicly available through various tools and is used by Google to form page quality assessments. However, not all websites are included in CrUX: sites must be publicly accessible and have sufficient traffic to generate statistically significant data [11].

The PSI report provides real-user experience measurements over the previous 28-day period for key metrics such as [12]:

- Largest Contentful Paint (LCP) – the time to load the largest visible content block;
- First Contentful Paint (FCP) – the time to first content rendering;
- First Input Delay (FID) – the delay in the first user interaction;
- Cumulative Layout Shift (CLS) – total layout shift;
- Interaction to Next Paint (INP) – time to respond to the next interaction;
- Time to First Byte (TTFB) – waiting time for the first byte.

Additionally, PSI invokes the Lighthouse tool, which generates a supplementary report based on controlled lab tests, including metrics such as:

- Time to Interactive (TTI) – time until the page becomes fully interactive;
- Total Blocking Time (TBT) – total time blocking user interactions;
- Speed Index (SI) – speed index of content rendering.

Note that some metrics are duplicated: some are derived from real CrUX data, others from Lighthouse lab tests. For example, First Contentful Paint (FCP) appears in both reports but is calculated differently, although measuring the same parameter – the time to first content rendering [13].

In addition to Core Web Vitals, PSI includes experimental metrics such as Interaction to Next Paint (INP) and Time to First Byte (TTFB).

Thus, PageSpeed Insights is a powerful web performance testing tool that combines real user data from Google and lab data from Lighthouse, providing detailed optimization recommendations.

Performance Evaluation Criteria

PSI uses the following key criteria:

1. First Contentful Paint (FCP): measures how long it takes the browser to render the first text, image, or SVG element after navigation.
2. Time to Interactive (TTI): indicates how long it takes for the page to become fully interactive (this metric is crucial because some sites optimize content visibility at the expense of interactivity).
3. Total Blocking Time (TBT): measures the total amount of time during which the page is unresponsive to user input (e.g., mouse clicks or keyboard presses).
4. Speed Index (SI): assesses how quickly the visible content is rendered during page load (the score is based on video capture of the loading process analyzed frame-by-frame).
5. Largest Contentful Paint (LCP): measures the time from navigation to when the largest visible element (text or image) is fully rendered.
6. Cumulative Layout Shift (CLS): calculates the total unexpected layout shifts during the page load that negatively impact user experience.
7. First Input Delay (FID): measures the delay between the user's first interaction (click, tap) and the browser's response to that interaction.

Experimental Metrics. As for the experimental indicators, there are two of them:

- Interaction to Next Paint (INP): measures responsiveness for all user interactions and reports a single aggregated value. A low INP indicates fast response times.
- Time to First Byte (TTFB): measures the time from request sent to the first byte received from the server, reflecting server responsiveness.

Result Evaluation. PageSpeed Insights classifies performance scores into three categories (fig. 4):

- Good – indicated by a green label, meaning high optimization level;
- Needs Improvement – yellow label, indicating issues that require fixing;
- Poor – red label, signaling serious performance problems.



Figure 4 – Example of labels in the LCP metric

PSI distributes these labels so that developers can understand the quality level of the webpage (fig. 5). For example, if 9% of users fall within the yellow LCP range, it means that 9% of all observed LCP values are between 2500 ms and 4000 ms.



Figure 5 – Example of LCP label distribution

Above each PSI metric distribution bar is the 75th Percentile. It exists to help understand where the majority of users fall on the site. In addition to the standard distribution, PSI evaluates the Core Web Vitals – a subgroup of performance

metrics designed to simplify the situation and help site owners focus on the most important criteria. The main metrics are LCP, FID, and CLS, which are collected from real user data [24]. Each represents a distinct aspect of user experience: LCP relates to loading, FID to interactivity, and CLS to visual stability. To receive a positive evaluation, all three Core Web Vitals metrics must be in the green zone. Otherwise, the assessment is not passed.

If PSI has insufficient data for FID, the site will pass the evaluation only if both LCP and CLS metrics are green. If there is not enough data for either LCP or CLS, the evaluation will be negative.

In summary, it is important to note that these metrics are a crucial component of the entire PageSpeed Insights system. They play a leading role in forming the performance evaluation criteria in the reports. PSI includes three types of metrics: the first belong to Core Web Vitals, the next to experimental metrics, and the rest to Lighthouse. The results of the evaluation criteria are indicated by marks that help determine the status of each metric.

DISCUSSION OF THE RESULTS

Performance Analysis of Lesya Ukrainka Volyn National University Website. In the previous section, we focused in detail on the performance evaluation tool PageSpeed Insights. The analysis of this tool's functionality allowed us to identify a set of performance evaluation criteria: Largest Contentful Paint, First Input Delay, Cumulative Layout Shift, First Contentful Paint, Interaction to Next Paint, Time to First Byte, Time to Interactive, Total Blocking Time, and Speed Index.

Let us now assess the performance of the Lesya Ukrainka Volyn National University website based on the above criteria (fig. 6).



Figure 6 – General Overview of the Core Web Vitals Performance Evaluation

By visiting the main PSI page (<https://pagespeed.web.dev/>) and entering the URL (<https://vnu.edu.ua/uk>), we obtain a performance evaluation of the main and

experimental webmetrics collected in CrUX over the last 28 days. It is immediately apparent that the website did not pass the evaluation of the core metrics.

Analysis of the first criterion, Largest Contentful Paint (LCP), for the website's performance evaluation allowed us to conclude that the largest element on the page loads too slowly and accordingly falls within the red zone.

Regarding the second criterion, First Input Delay (FID), its evaluation indicates that the time for the first user interaction with the content is fast.

A similar situation is observed with Cumulative Layout Shift (CLS), as it is in the green zone, which allows us to state that the site's visual stability is at a high level. Consequently, the interaction with the webpage is smooth.

Despite the fact that two core web vitals are in the green zone, the test still did not receive a positive overall assessment because the LCP metric has a stronger influence on the final score.

Analysis of the First Contentful Paint (FCP) criterion showed that the page loading occurs with delay, placing this metric in the red zone.

Regarding experimental metrics, it was found that they fall within the green zone. This means the page is capable of quickly responding to all or most user interactions and the server responds promptly to site requests.

Now let us analyze the site according to the Lighthouse report generated from data collected and analyzed in a controlled environment.

A positive aspect of the report is that the Total Blocking Time, which measures the time during which the page is unresponsive to user input, is low.

It is also worth noting that CLS is low, thus ensuring smoothness and effectiveness of the webpage. However, the Time to Interactive (TTI) metric, which reflects interactivity, is in the yellow zone. This may have negative consequences such as loss of user engagement, since sometimes the site appears ready, but when the user tries to interact with it, nothing happens due to slow interactivity (fig. 7).

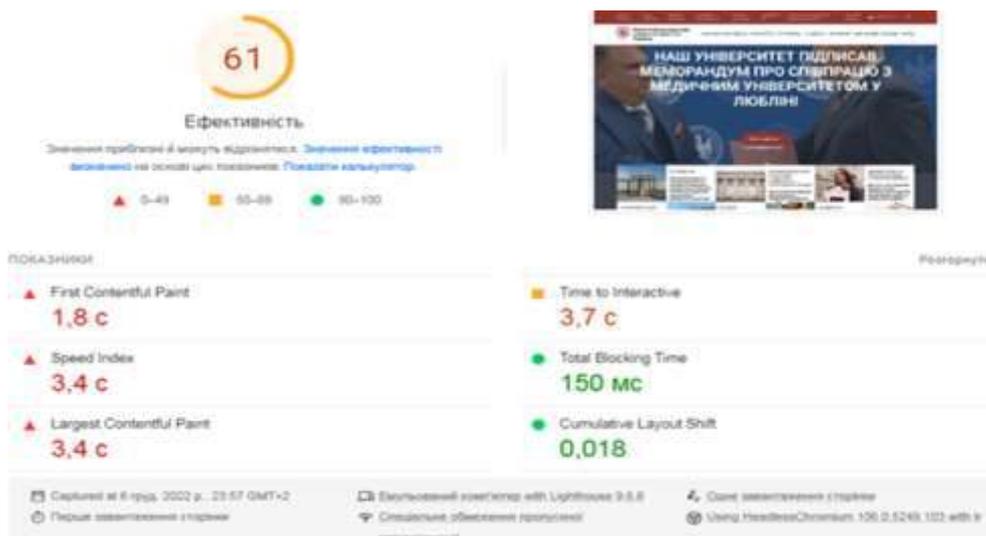


Figure 7 – General Overview of the Lighthouse Performance Assessment

We observe that the next metric is FCP (First Contentful Paint), which measures the time it takes for the first piece of content to appear on the page. In the report, it is marked in red, indicating that, for certain reasons, the website's loading time may be significantly delayed.

A similar situation is seen with the Speed Index and LCP (Largest Contentful Paint), both of which are also in the red zone. The Speed Index reflects how quickly content is visually displayed during page load. Therefore, if this metric is slow, the entire content on the site appears with delay. The LCP measures the time it takes to load the largest visible block (text or image) in the viewport relative to when the page first started loading. For optimal performance, larger elements should begin loading earlier, allowing the webpage to function faster.

From the analysis of the website, it is clear that some of the Lighthouse criteria and core web performance metrics, specifically LCP, FCP, and Speed Index, are marked red. This indicates existing issues related to efficient page loading and content rendering speed that need to be addressed.

CONCLUSIONS

It can be concluded that performance plays a crucial role in the development of websites, as it enhances user experience, usability, and overall user satisfaction.

1. It has been substantiated that performance is a complex concept characterized by multiple criteria. In practical terms, it measures how quickly a website loads and how it renders during loading, since these factors determine the success and quality of a web page. It was analyzed that due to the rapid development of web technologies, a wide range of tools such as Lighthouse, WebPageTest, GTmetrix, and Google PageSpeed Insights have emerged.

2. It has been established that PageSpeed Insights is a leading tool in its field, collecting information from various sources and performing a comprehensive analysis of overall website performance, generating reports on core web metrics as well as Lighthouse data.

3. Key website performance criteria were highlighted, including Largest Contentful Paint, First Input Delay, Cumulative Layout Shift, First Contentful Paint, Interaction to Next Paint, Time to First Byte, Time to Interactive, Total Blocking Time, and Speed Index. Several issues related to long page load times were identified, such as the use of PNG or JPG image formats, which compress poorly and therefore increase website loading duration.

4. Based on the identified criteria, an analysis of the performance of the Volyn National University named after Lesya Ukrainka website was conducted, revealing existing shortcomings. Optimization steps were proposed for the site developers to improve the overall performance of the website.

REFERENCES

- [1] Wikipedia. (n.d.). Вебсайт. Retrieved November 23, 2022, from <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
- [2] Van Deusen, K. (n.d.). What is website performance and how do you test it?. OGAL Web Design. Retrieved November 23, 2022, from <https://ogalweb.com/website-performance-what-it-means-and-how-to-test-it/>

- [3] MDN Web Docs. (n.d.). What is web performance? - Learn web development | MDN. Retrieved November 23, 2022, from https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Learn/Performance/What_is_web_performance
- [4] Chrome Developers. (n.d.). Lighthouse overview – Chrome Developers. Retrieved November 24, 2022, from <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/overview/>
- [5] Chrome Developers. (n.d.). Overview – Chrome Developers. Retrieved November 24, 2022, from <https://developer.chrome.com/docs/devtools/overview/>
- [6] WebPageTest. (n.d.). WebPageTest. Retrieved November 24, 2022, from <https://www.webpagetest.org/>
- [7] Ghiam, O. (n.d.). 7 best website performance test tools in 2022. Webflow Blog. Retrieved November 23, 2022, from <https://webflow.com/blog/website-performance-test-tools>
- [8] Chrome Developers. (n.d.). About PageSpeed Insights – Google Developers. Retrieved November 23, 2022, from <https://developers.google.com/speed/docs/insights/v5/about>
- [9] Chrome Developers. (n.d.). About CrUX – Chrome Developers. Retrieved November 23, 2022, from <https://developer.chrome.com/docs/crux/about/>
- [10] loadninja. (n.d.). How to use Google PageSpeed Insights (the right way). Retrieved November 23, 2022, from <https://loadninja.com/articles/google-pagespeed-insights/>
- [11] DebugBear. (n.d.). What is Google's Chrome User Experience Report? | DebugBear. Retrieved November 23, 2022, from <https://www.debugbear.com/blog/chrome-user-experience-report>
- [12] Chrome Developers. (n.d.). CrUX methodology – Chrome Developers. Retrieved November 23, 2022, from <https://developer.chrome.com/docs/crux/methodology/>
- [13] Chrome Developers. (n.d.). First contentful paint – Chrome Developers. Retrieved November 24, 2022, from <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/performance/first-contentful-paint/>
- [14] Chrome Developers. (n.d.). Time to interactive – Chrome Developers. Retrieved November 24, 2022, from <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/performance/interactive/>
- [15] Chrome Developers. (n.d.). Total blocking time – Chrome Developers. Retrieved November 24, 2022, from <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/performance/lighthouse-total-blocking-time/>
- [16] Chrome Developers. (n.d.). Speed index – Chrome Developers. Retrieved November 24, 2022, from <https://developer.chrome.com/docs/lighthouse/performance/speed-index/>
- [17] web.dev. (n.d.). Largest contentful paint (LCP). Retrieved November 24, 2022, from <https://web.dev/lcp/>
- [18] web.dev. (n.d.). Cumulative Layout Shift (CLS). Retrieved November 24, 2022, from <https://web.dev/cls/>

- [19] web.dev. (n.d.). First input delay (FID). Retrieved November 24, 2022, from <https://web.dev/fid/>
- [20] web.dev. (n.d.). Interaction to next paint (INP). Retrieved November 24, 2022, from <https://web.dev/inp/>
- [21] MDN Web Docs. (n.d.). Time to first byte - MDN Web Docs Glossary. Retrieved November 24, 2022, from https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/time_to_first_byte

ОЦІНКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВЕБ-САЙТІВ ЗАСОБАМИ GOOGLE PAGESPEED INSIGHTS

Линник Ю. М. Канд. пед. наук, доцент

*Волинський національний університет імені Лесі Українки /
Україна*

Анотація: у статті досліджено особливості визначення ефективності веб-сайтів із використанням інструменту Google PageSpeed Insights. Розглянуто основні критерії ефективності веб-сторінок, зокрема швидкість завантаження, інтерактивність та стабільність відображення контенту. Проведено аналіз існуючих підходів до оцінки продуктивності веб-сайтів та обґрунтовано доцільність використання Google PageSpeed Insights для їх оптимізації. Практична частина дослідження спрямована на оцінку ефективності веб-сайту Волинського національного університету імені Лесі Українки, що дозволило виявити ключові недоліки та сформулювати рекомендації щодо їх усунення. Теоретична значимість роботи полягає в уточненні поняття «ефективність веб-сайту» та аналізі методів її оцінки. Практична цінність дослідження полягає у розробці рекомендацій щодо покращення продуктивності веб-ресурсів.

Ключові слова: ефективність веб-сайту, Google PageSpeed Insights, оптимізація, швидкість завантаження, продуктивність, веб-технології.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
02.04.2025 р.	12.05.2025 р.	21.06.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-03>
УДК 655.226

Луцків М. М.
д-р, техн., наук, професор
ORCID: 0000-0002-2921-3662
Федина Б. І.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0001-9487-2851
Наконечний М. Д.
ORCID: 0009-0008-1362-0803

Українська академія друкарства
/ Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТОНОВІДТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ РАСТРОВНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПРИ ЗМІНІ ТОВЩИНИ ФАРБИ

Анотація: у статті розроблено математичну модель тоновідтворення цифрових растрових зображень для елементів ромбічної форми при зменшенні товщини фарби на інтервалі тонопередачі у комбінованих офсетних друкарських системах простої конструкції на основі анілоксового валика у якому відсутні механізми зонального налагодження подачі фарби на заданий наклад. Дана модель дає можливість здійснити растрування цифрових зображень темних тонів і побудувати характеристики растрового перетворення, визначити кількість фарби на поверхні растрових елементів, визначити градаційні характеристики цифрових зображень після покриття растрових елементів фарбою та визначити інтегральну растрову оптичну густину зображень. Для спрощення розв'язання поставлених завдань в пакеті MATLAB: Simulink розроблена структурна схема моделі симулятора тоновідтворення цифрових зображень при зменшенні товщини фарби, яка дає можливість розрахувати і будувати характеристики растрування, графіки кількості фарби на поверхні растрових елементів та растрової оптичної густини зображень, а їх результати візуалізуються блоками Scope і Display.

Результатом моделювання заданої градаційної характеристики вхідного цифрового зображення темної тональності є легко вгнута крива, яка на початку діапазону має малу крутизну, що не викликає постеризацію на темних ділянках зображення, тому не погіршує результатів дослідження. Ромбічні растрові елементи розтягують характеристику растрування, зсувають її у більш темні тони і притемнюють деталі на темних ділянках зображення та розсвітлюють світлі. Встановлено, що зменшення товщини фарби на інтервалі значно впливає на кількість фарби на поверхні растрових елементів, а відтак на тональність зображення. Початкові значення растрової оптичної густини зображення становить 2,407 одиниць. Зменшення товщини фарби значно зменшує оптичну густину зображення і на початку діапазону при $L_0=50$ рівнів різниці оптичних густин становить 0,68

одиниць і є досить велика та кількісно оцінює вплив зміни товщини фарби на оптичну густину зображення.

Ключові слова: модель, тоновідтворення, цифрове зображення, растрування, друкарська система, товщина фарби, симулювання, градаційні характеристики, оптична густина.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасна технологія приготування зображень до друку набула нового змісту і відмінна від попередніх. Основні процеси і обробка образотворчої інформації виконується за допомогою спеціалізованих комп'ютерних видавничих системах. Растрування і синтез тоновідтворення здійснюється за умови, що друкарська система оснащена автоматичною системою багатоканальної зональної подачі фарби на заданий наклад, яка забезпечує сталу подачу товщини фарби на поверхні відбитка офсетної друкарської машини. Західні фірми розробили і почали оснащувати друкарські машини простими за конструкцією комбінованими фарбодрукарськими апаратами, які мають малу кількість фарбових валиків та у яких відсутні механізми регулювання її подачі.

Встановлено, що товщина фарби на відбитку може змінюватися на 20-30 %, що обмежує їх застосування для якісного друку книжкової та журнальної продукції [2, 3, 4, 7, 8]. У доступних джерелах відсутня інформація та аналіз впливу зміни товщини фарби на тоновідтворення цифрових растрових зображень на інтервалі тонопередачі. Отже моделювання тоновідтворення цифрових растрових зображень при зміні товщини шару фарби на інтервалі є актуальним завданням.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У комбінованих фарбодрукарських системах відбуваються складні процеси модуляції неперервних фарбових потоків растровою друкарською формою та передача фарбового зображення через офсетний циліндр на задрукований матеріал. Тому відомі методи теорії модуляції сигналів для растрування зображень безпосередньо неможливо застосувати для фарбодрукарських систем. У ряді праць опрацьовані статичні і динамічні моделі друкарських систем різної розмірності й структури, які їх характеризують як об'єкт регулювання товщини шару фарби на виході системи при дії різних впливів та збурень [3, 7, 8]. У працях [7, 8] подані результати моделювання й аналізу статичної точності товщини потоків фарби у комбінованих фарбодрукарських системах і встановлено, що товщина шару фарби залежить від розмірності системи і може знаходитися в межах 20-30 %. У роботі [7, 8] розроблені і проаналізовані моделі тоновідтворення виражені кількістю фарби на поверхні растрової шкали на відбитку та інтервалі тонопередачі, яка визначається за графом фарбодрукарської системи.

На основі графа фарбодрукарської системи і виразу (1) розраховано та побудовано характеристики нафарблення для систем різної розмірності і проаналізовані їх властивості:

$$G_b = F(h_\varphi, S_{\text{ЛН}}), \text{ якщо } 0 \leq S_{\text{ЛН}} \leq 1, \quad (1)$$

де: h_ϕ – залежність товщини фарби від інтервалу тонопередачі;

S_{LH} – лінійна растрова шкала друкарської форми, яка змінюється в межах $[0 \leq S_{LH} \leq 1]$.

В монографії [2] викладені статичні та динамічні моделі передачі фарбових потоків у комбінованих фарбодрукарських системах послідовної структури різної розмірності. Побудовано та проаналізовано характеристики товщини шару фарби на виході системи та встановлено, що статична точність товщини сягає 20-30 % залежно від розмірності. Розроблено моделі передачі кількості фарби для контрольної растрової друкарської форми та її передачі на офсет і задрукований матеріал. Опрацьовано алгоритм синтезу тонопередачі комбінованих фарбодрукарських систем на основі кількості фарби (1) і бажаної (заданої) характеристики тонопередачі, яка залежить від сюжету оригіналу і відповідає характеристиці растрування форми S_z та кількості фарби на відбитку:

$$G_b = h_\phi \times S_z. \quad (2)$$

Характеристика коригувальної ланки визначається із умови рівності виразів (1) і (2). Розроблено симулятори синтезу тонопередачі комбінованих фарбодрукарських систем різної розмірності. Зауважимо, що розроблений синтез тонопередачі на основі кількості фарби має обмеження, а параметри синтезу не пов'язані із градаційними характеристиками цифрових зображень, тому технолог, дизайнер і друкар не мають можливості безпосередньо управляти процесом, використовуючи градаційні характеристики цифрових зображень, що зменшує ефективність та якість синтезу.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Розробити математичну модель тоновідтворення цифрових зображень, визначити кількість фарби на поверхні растрових елементів і цифрового зображення після покриття фарбою та визначити його оптичну густину, розробити симулятор тоновідтворення, подати і проаналізувати результати імітаційного моделювання.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Растрування є важливою стадією підготовки зображення і виготовлення друкарських форм, необхідних для друку. Воно значною мірою впливає на якість друкованого зображення. Для розв'язання поставленої задачі моделювання тоновідтворення цифрових растрованих зображень при зміні товщини шару фарби на інтервалі приймаємо, що задана нормована градаційна характеристика цифрового зображення заданої тональності, яку згенеруємо за допомогою традиційного степеневого перетворення [6, 10]:

$$L_n = cL_o^{1,6}, \text{ якщо } 0 \leq L_o \leq 1, \quad (3)$$

де: L_0 – лінійна шкала;

c – масштаб, значення показника степені $r = 1,6$ задає нормовану градаційну характеристику цифрового зображення L_n , яка подана рівнями сірого в межах $0 \leq L_n \leq 1$.

Здійснимо растрування цифрового зображення (3) і визначимо відносну площу растрових елементів [6]:

$$S = 1 - L_n. \quad (4)$$

Для дослідження приймаємо ромбічні растрові елементи. Характеристика растрування має S – подібну форму, яка описується інтегральним виразом [4], і яку сформуємо функцією S – shaped MF і тоді на основі виразу (4) відносна площа ромбічної форми набуде вигляду:

$$S_r = S\text{-shapedMF}(1 - L_n), \text{ якщо } 0 \leq L_n \leq 1. \quad (5)$$

Визначимо кількість фарби на одиницю поверхні растрових елементів ромбічної форми:

$$V_r = S_r \times H, \quad (6)$$

де: H – товщина фарби на поверхні растрових елементів подана у відносних одиницях.

На основі кількості фарби визначено цифрове зображення після покриття фарбою:

$$L_{fr} = (1 - V_r) \times 255. \quad (7)$$

Звідси визначимо растрову оптичну густину нафарбленого зображення [6]:

$$D = \log_{10} \left[\frac{255}{(L_{fr} + 1)} \right]. \quad (8)$$

На основі викладеного і виразів (3)-(8) можна розрахувати та побудувати градаційні характеристики, характеристики растрування, нафарблення й графіки оптичної густини. Для спрощення розв'язання поставлених завдань застосовано об'єктно-орієнтоване моделювання в пакеті MATLAB: Simulink та розроблено модель симулятора тоновідтворення цифрових растрових зображень при зміні товщини шару фарби на інтервалі тонопередачі, структурну схему якого подано на рисунку 1.

Основними складовими моделі симулятора є функціональні блоки математичних функцій F_{cn} , які здійснюють необхідні розрахунки за виразами

(3)-(8), та результати яких візуалізуються блоками Scope. Блок Ramp генерує лінійну шкалу L_0 , яка масштабується (ділиться на 255) у блоці Gain і подається на вхід блоку математичних функцій F_{cn} у діалоговому вікні якого записана програма (вираз (3)) для формування нормованої градаційної характеристики L_n , яка візуалізується блоками Scope і подається на вхід блоку математичних функцій F_{cn1} , який за виразом (4) розраховує відносну площу S растрового перетворення і подає на вихід на вхід блоку S – shaped, у якому формується ромбічна форма елемента S_r , яка візуалізується блоком Scope 1. Блок Ramp 1 і блок математичних функцій F_{cn2} формують змінну відносну товщину фарби H на інтервалі тонопередачі, яка подається на вхід блоку множення Product. На його другий вхід подається відносна площа S_r , внаслідок чого на його виході одержується кількість фарби V_r1 , яка подається на вхід блоку математичних функцій F_{cn3} у діалоговому вікні якого записана програма (вираз (7)) для обчислення цифрового зображення L_{fr1} після покриття фарбою і подається на вхід блоку математичних функцій F_{cn4} у якому за виразом (8) розраховується растрова оптична густина зображення $D1$, яка подається на мультиплексор і візуалізується блоком Scope 5.

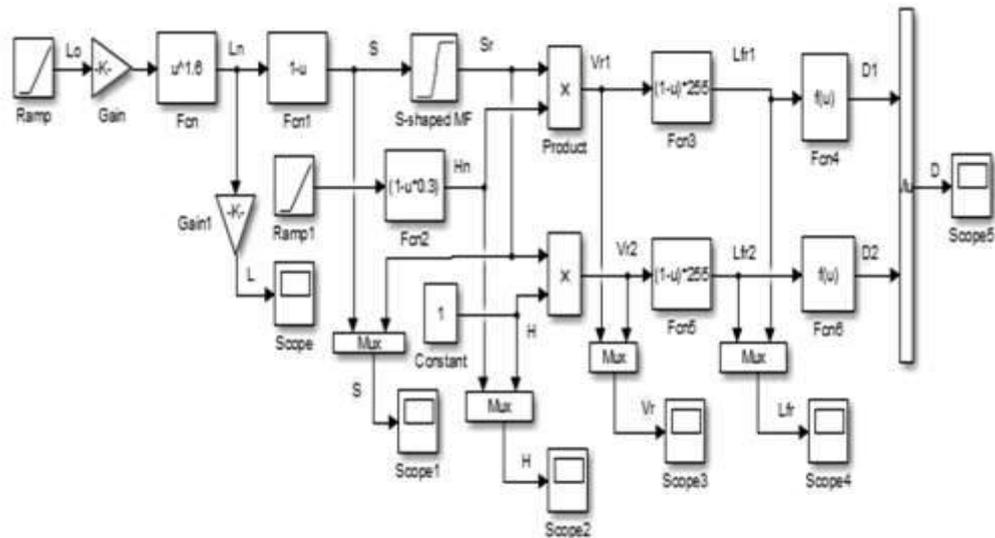


Рисунок 1 – Структурна схема моделі симулятора

У нижній частині розташована схема для визначення параметрів моделі при сталій товщині фарби. У другому блоці множення Product 1 визначається кількість фарби на поверхні растрових елементів при сталій відносній товщині фарби $H = 1$, яка подається на вхід блоку математичних функцій F_{cn5} . У цьому блоці визначається цифрове зображення L_{fr2} , яке подається на вхід блоку математичних функцій F_{cn6} , де визначається растрова оптична густина $D2$ зображення при сталій товщині фарби, яка візуалізується блоком Scope 5.

Після налаштування симулятора на задані параметри (3) – (8) задаємо у блоці математичних функцій F_{cn} показник степені $r = 1,6$, який відповідає

чорним тонам. Налаштували блок S – shaped на параметри [0,1], що відповідають ромбічній формі растрових елементів. Результати імітаційного моделювання заданої градаційної характеристики цифрового зображення подані на рисунку 2.

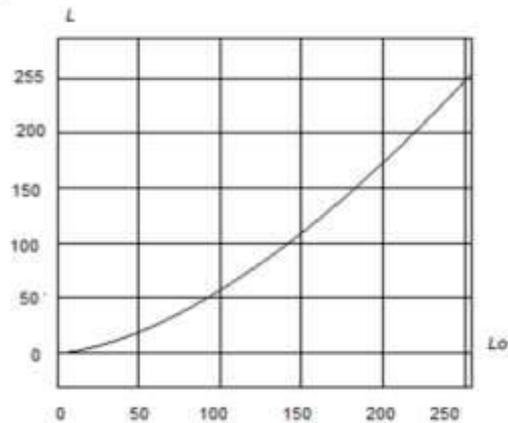


Рисунок 2 – Градаційна характеристика заданого зображення

Градаційна характеристика заданого вхідного цифрового зображення – це легко вгнута крива, яка на початку діапазону тонопередачі має малу крутизну, що не викликає постеризації на темних ділянках зображення, тому не погіршує результати дослідження.

Результати моделювання характеристик растрування зображення подані на рисунку 3.

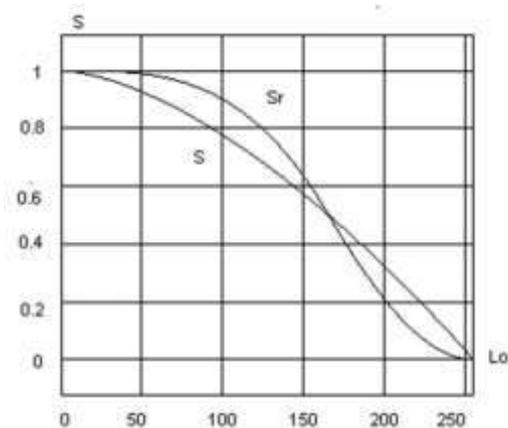


Рисунок 3 – Характеристика растрового перетворення

Характеристика растрування вхідного зображення S є легко випуклою кривою, яка має початкове значення відносної площі рівне одиниці, що

відповідає чорному кольору і плавно прямує до нульового кінцевого значення. Ромбічні растрові елементи розтягують характеристику растрування та зсовують у більш темні тони. В околі $L_0 = 170$ рівнів вона стає більш крутою, перетинає попередню криву, а її крутизна зменшується, стає вгнутою кривою та прямує до нульового значення. Отже ромбічна форма растрових елементів значною мірою впливає на растрове перетворення, притемнює деталі на темних ділянках зображення, натомість розсвітлює світлі ділянки зображення.

Результати моделювання кількості фарби на поверхні растрових елементів різної форми при відносній зміні товщини фарби в межах $[1 \leq H \leq 0,7]$ і при сталій товщині фарби подані на рисунку 4.

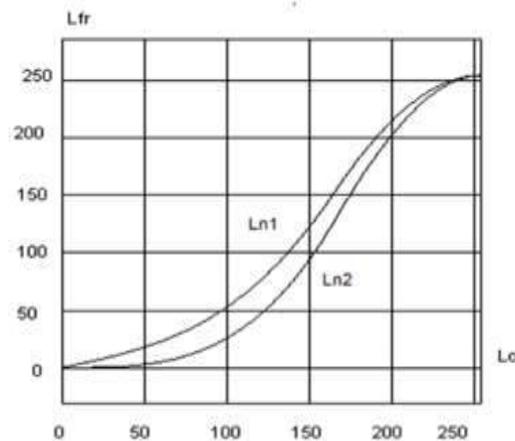


Рисунок 4 – Графіки кількості фарби на поверхні растрових елементів

Графіки відносної кількості фарби на поверхні растрових елементів на інтервалі тонопередачі є випуклими кривими, мають початкове значення відносної кількості фарби рівне одиниці. При зміні товщини фарби в межах $[1, 0,7]$ характеристика кількості фарби V_{r1} має меншу крутизну і розташована значно нижче ніж при кількості фарби V_{r2} для сталої товщини фарби та зміщена у темні тони. Отже зменшення товщини фарби на інтервалі значно впливає на кількість фарби на поверхні растрових елементів, а відтак на тональність зображення.

Результати моделювання градаційних характеристик цифрового зображення після растрування і покриття фарбою подані на рисунку 5.

Градаційні характеристики нафарблених зображень є вгнутими кривими. Градаційна характеристика L_{fr1} при зменшенні товщини фарби на інтервалі тонопередачі на початку інтервалу має велику крутизну, добре відтворює деталі на темних ділянках зображення, натомість градаційна характеристика L_{fr2} при сталій товщині фарби має малу початкову крутизну і розташовується нижче попередньої, тому притемнює зображення на початку і в середині діапазону тонопередачі.

Результати моделювання растрової оптичної густини зображень подані на рисунку 6.

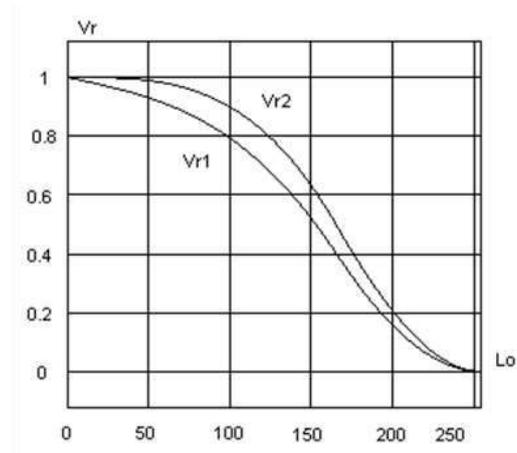


Рисунок 5 – Градаційні характеристики цифрового зображення після растровання і покриття фарбою

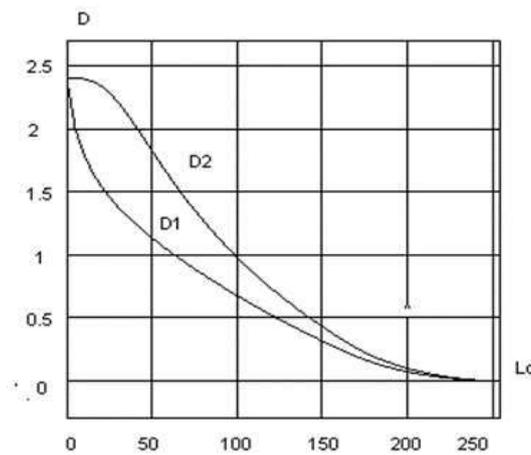


Рисунок 6 – Графіки растрової оптичної густини зображень

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Позитивні результати перевірки слід оформляти свідоцтвом перевірки, а в паспорті приладу виконується запис результатів перевірки і ставиться дата і підпис особи, яка проводила перевірку, скріплена відбитком повірочного тавра.

При негативних результатах перевірки датчик до застосування не допускається. У паспорті (або документі його замінює) здійснюється запис про непридатність датчика, а повірочного тавра годиться.

За результатами перевірки складається протокол запису результатів перевірки за відповідною формою. Початкові значення растрової оптичної густини зображень становлять 2,407 одиниць. Графік оптичної густини D1 при зміні товщини фарби є вгнутою кривою і плавно прямує до кінцевого нульового значення. Натомість графік оптичної густини D2 при сталій товщині фарби є випуклою кривою, яка розташована вище попередньої, що викликає

притемнення зображення на усьому інтервалі тонопередачі. Встановлено, що на початку діапазону при $L_0 = 50$ рівнів при зміні товщини фарби оптична густина становить $D1 = 1,17$ одиниць, а при сталій товщині фарби $D2 = 1,85$ одиниць. Зауважимо, що традиційно растрова оптична густина кількісно оцінює тональність растрового зображення, тому різниця оптичних густин $0,68$ одиниць є досить велика і кількісно оцінює вплив зміни товщини фарби на оптичну густину зображення.

Результати досліджень можна застосувати під час підготовки цифрових зображень до друку на друкарських машинах з комбінованими фарбодрукарськими апаратами.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель тоновідтворення цифрових растрових зображень при зміні товщини фарби у комбінованих офсетних фарбодрукарських системах, яка дає можливість здійснити растрування заданих цифрових зображень для ромбічних растрових елементів, визначити кількість фарби на поверхні растрових елементів, визначити цифрові зображення після покриття фарбою і оптичну густину нафарбленого зображення.

В пакеті MATLAB: Simulink розроблено модель симулятора тоновідтворення цифрових растрових зображень при зміні товщини шару фарби, яка дає можливість розрахувати і побудувати характеристики растрування, графіки кількості фарби на поверхні растрових елементів та визначати растрову оптичну густину зображень.

Було задано вихідну градаційну характеристику темних тонів зображень, ромбічну форму растрових елементів і зміну товщини шару фарби на інтервалі в межах $[0,7 - 1,0]$ відносних одиниць. Встановлено, що ромбічні растрові елементи розтягують характеристику растрування і зміщують її у більш темні тони, яка в околі $L_0 = 170$ рівнів стає більш крутою, а на світлому діапазоні стає вгнутою кривою і послідовно прямує до нульового значення. Отже, ромбічна форма растрових елементів значною мірою впливає на растрове перетворення та притемнює деталі на темних ділянках зображень, натомість розсвітлює світлі. Доведено, що змінна товщини фарби на інтервалі зміщає характеристику кількості фарби на поверхні растрових елементів, а відтак впливає на тон зображення.

Встановлено, що початкові значення растрової оптичної густини зображень становлять $2,407$ одиниць. Графік оптичної густини при сталій товщині фарби є випуклою кривою, яка розташована вище графіка оптичної густини при зміні фарби, що викликає значне притемнення зображень на усьому інтервалі тонопередачі. Доведено, що на початку діапазону при $L_0 = 50$ рівнів при зміні товщини фарби оптична густина становить $D1 = 1,17$ одиниць, а при сталій товщині $D2 = 1,85$ одиниць. Зауважимо, що традиційна растрова оптична густина кількісно оцінює тональність растрового зображення, тому різниця оптичних густин $0,68$ одиниць є досить велика і кількісно оцінює вплив зміни товщини фарби на оптичну густину зображення.

На основі проведених досліджень та результатів імітаційного моделювання встановлено, що необхідно більше уваги приділяти вибору форми растрових елементів і зміні товщини шару фарби на інтервалі тонопередачі, щоб не внести зайвих спотворень зображень.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Барановський І. В., Яхимович Ю. П. Поліграфічна переробка образотворчої інформації: навч. посіб. Київ-Львів : ІЗМН, 1998. 400 с.
- [2] Дурняк Б. В., Сеньківський В. М., Луцків М. М., Мусійовська М. М. Інформаційна технологія тоновідтворення в коротких фарбодрукарських системах послідовної структури: монографія. Львів, УАД. 2021. 176 с.
- [3] Лозовий П. І. Симулятор статичних характеристик фарбопередачі растрового зображення фарбодрукарською системою фірми Witag. *Технологія і техніка друкарства*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2010, Вип. 2. С.171-178.
- [4] Луцків М. М., Курка П. З. Модель нафарблення растрових елементів ромбічної форми. *Комп'ютерні технології друкарства*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2015. №2 (34). С. 80-87.
- [5] Луцків М. М., Мусійовська М. М. Моделювання тоновідтворення, вираженої кількістю фарби на растрових точках. *Наукові записки*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2011. №4 (34). С. 265-268.
- [6] Мартинюк В. Т. Основи додрукарської підготовки образотворчої інформації: підручник. Кн. 3 : Процеси опрацювання образотворчої інформації. Київ : Університет «Україна», 2009. 291 с.
- [7] Мусійовська М. М. Статична точність коротких фарбодрукарських систем при відтворенні тонового зображення. *Поліграфія і видавнича справа*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2011. №1 (53). С. 128-138.
- [8] Мусійовська М. М. Аналіз точності короткої друкарської системи послідовної структури залежно від її розмірності. *Квалілогія книги*: зб. наук. праць. Львів : УАД, 2010. №1 (28). С. 43-51.
- [9] Пашуля П. Л. Стандартизація, метрологія, відповідність, якість у поліграфії: підручник. Львів : УАД, 2011, 408 с.
- [10] Gonsales C., Woods E. Digital image pressing: International Version 3rd Edition, Inc publishing as Printice Hall. Copyright. 2008. 1104 s.

SIMULATION OF TONE REPRODUCTION OF DIGITAL RAST IMAGES WITH CHANGE OF PAINT THICKNESS

Lutskiv M. DThSc., Professor
Fedyna B. PhD, Associate Professor
Nakonechnyi M.
Ukrainian Academy of Printing / Ukraine

Abstract. A mathematical model of tonal reproduction of digital raster images for elements of a rhombic shape with a decrease in the thickness of the paint on

the tonal transfer interval in combined offset printing systems of a simple design based on an anilox roller, which lacks mechanisms for zonal adjustment of paint supply to a given overlay, has been developed, which makes it possible to perform rasterization of digital images of dark tones and plot the characteristics of the raster transformation, determine the amount of paint on the surface of the raster elements, determine the gradation characteristics of digital images after covering the raster elements with paint, and determine the integral raster optical density of images. In order to simplify the solution of the tasks in the MATLAB: Simulink package, a structural diagram of the model of the simulator for tonal reproduction of digital images with a decrease in paint thickness has been developed, which makes it possible to calculate and build raster characteristics, graphs of the amount of paint on the surface of raster elements and the raster optical density of images, and their results are visualized by the Scope and Display blocks.

The presented results of simulation of the given gradation characteristic of the input digital image of a dark tonality is a slightly concave curve and has a small slope at the beginning of the range, which does not cause posterization in the dark areas of the image, therefore, does not impair the research results. Rhombic raster elements stretch the raster characteristic and shift it to darker tones and darken the details in the dark areas of the image and lighten the light ones. It was established that the decrease in the thickness of the paint on the interval significantly affects the amount of paint on the surface of the raster elements, and therefore the tonality of the image. The initial values of the raster optical density of the image is 2.407 units. A decrease in paint thickness significantly reduces the optical density of the image, and at the beginning of the range at $L_0=50$ levels, the difference in optical densities is 0.68 units, which is quite large and quantitatively evaluates the effect of changing the paint thickness on the optical density of the image.

Keywords: model, tone reproduction, digital image, rasterization, printing system, paint thickness, simulation, gradation characteristics, optical density.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
17.02.2025 р.	25.04.2025 р.	21.06.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-04>
УДК 621.923

Молчанов В. Ф.
канд., техн., наук, доцент
ORCID 0000-0003-2807-5875
Латишев Д. В.

Дніпровський державний
технічний університет / Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА УСТАНОВОК ДЛЯ СИСТЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОР ТА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ЇХ ПАРАМЕТРІВ

Анотація: досліджено закономірності процесу фільтрації технологічних рідин через пористі матеріали та розроблені високоефективні установки для систем експлуатації мастильно-охолоджуючих рідин. В процесі експлуатації рідини безперервно і інтенсивно забруднюються твердими частками металообробки. Для відновлення властивостей технологічні рідини очищають від механічних домішок. Найбільш широке застосування отримують способи очистки технологічних рідин фільтрацією. Використання фільтрації для очистки технологічних рідин найефективніше, оскільки при фільтрації через шар пористих матеріалів можна досягти повного видалення твердих часток із рідин.

Метою даної роботи є дослідження установок для очистки мастильно-охолоджуючих рідин в умовах механічних цехів і розробка нового високоефективного устаткування для очистки МОР металорізальних верстатів та методик розрахунку їх параметрів.

В результаті впровадження розробок для систем експлуатації МОР та методик розрахунку їх параметрів відпадає необхідність в придбанні дорогих фільтрувальних матеріалів, збільшено термін експлуатації МОР в технологічному ланцюзі на 3%, збільшена стійкість різального інструменту на 6-8%, підвищена якість оброблюваних поверхонь.

Використання запропонованих високоефективних розробок фільтрувального обладнання забезпечує повне освітлення МОР і глибоке видалення твердих часток цінної вторинної сировини металообробки, зокрема для порошкової металургії, створює умови для організації безвідходного виробництва, підвищує рівень екологічної безпеки на ділянці експлуатації МОР.

Ключові слова: технологічні рідини; тверді частки; фільтрація; фільтрувальні установки; пористі матеріали; методика розрахунку.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасне машинобудівне виробництво вимагає застосування сучасного високоефективного технологічного обладнання. Характерною ознакою сучасного машинобудівного виробництва є застосування сучасних інформаційних технологій для автоматизація технологічного устаткування. Це

дозволяє з одного боку скоротити терміни підготовки машинобудівного виробництва та збільшити продуктивність випуску промислової продукції, а з іншої – зменшити трудомісткість виготовлення промислової продукції та знизити її вартість при високій якості.

Стрімке впровадження високопродуктивного технологічного устаткування в сучасному машинобудівному виробництві призводить до інтенсивного збільшення обсягу металообробки. Це у свою чергу збільшує об'єми використання технологічних мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) та призводить до утворення значної кількості стружки та шламу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На даний час в машинобудуванні інтенсивно розвиваються основні технологічні процеси, які пов'язані з обробкою металів різанням. Деякі з них доведені до вищого ступеня досконалості та автоматизації. Допоміжні процеси, які пов'язані з транспортуванням та переробкою стружки, приготуванням, зберіганням, очищенням і регенерації МОР залишаються далеко не вирішеними, і стримують в значній мірі розвиток основних технологічних процесів. Для більшості виробництв механізація і автоматизація вказаних допоміжних операцій є вирішальною при підвищенні ефективності виробництва [1].

В даний час у вітчизняному машинобудуванні при обробці деталей утворюється велика кількість стружки. Сучасне машинобудівне виробництво може нормально функціонувати тільки в тому випадку, якщо стружка, що утворюється в процесі різання, своєчасно відводиться від верстатів і з цеху. Проте для прибирання стружки і шламу, її транспортування і переробки, очистки та відновлення МОР використовується малоефективне обладнання. Це в значній мірі збільшує експлуатаційні витрати і підвищує собівартість продукції.

Організація переробки вторинних чорних металів в місцях їх утворення і вибір найбільш раціональних способів для досягнення цієї мети представляє значний інтерес, оскільки при такій переробці можна значно скоротити витрати на транспортні роботи, понизити втрати металевої стружки, як цінної сировини.

Проте, на деяких операціях масового виробництва при обробці різанням деталей допоміжні процеси недостатньо вивчені і вимагають проведення додаткових лабораторних і промислових досліджень. Всебічне вивчення допоміжних процесів пов'язаних з транспортуванням і переробкою металевої стружки і шламу дозволить запровадити сучасне обладнання для транспортування вказаної стружки і шламу металорізальних верстатів з подальшим розділенням на фази і очисткою МОР від твердих часток.

Проведені протягом останнього десятиліття глибокі теоретичні і експериментальні дослідження в області допоміжних процесів машинобудування дозволило розвинути один з перспективних напрямів підвищення продуктивності в машинобудуванні шляхом подальшого вдосконалення рівня механізації і автоматизації допоміжних процесів, зокрема транспортування і переробки стружки, очистки і відновлення МОР [2].

Проведені пошукові, теоретичні, експериментальні дослідження дозволили створити новий спектр високоефективного устаткування і розробити ряд комплексних систем для експлуатації МОР, транспортування і переробки стружки.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою даної роботи є дослідження установок для транспортуванню стружки і шламу, очистки МОР в умовах механічних цехів і розробка нового високоефективного устаткування для транспортування металевої стружки і шламу, очистки мастильно-охолоджуючих рідин металорізальних верстатів та методик розрахунку їх параметрів.

Застосування мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) є однією з умов підвищення якості поверхні деталей машин при обробці різанням, особливо на фінішних операціях. Аналіз впливу рідин на поверхневий шар показує, що застосування МОР значною мірою знижує сили тертя в парі інструмент - деталь, зменшує зношування і затуплення різальних кромки шліфувального круга, підвищує якість шліфованих поверхонь.

Проте в процесі експлуатації мастильно-охолоджуючі рідини безперервно і інтенсивно забруднюються твердими частками металообробки, які зменшують зносостійкість інструменту, збільшують припалювання поверхонь, знижують термін експлуатації МОР [3, 4]. Для підвищення якості оброблюваних поверхонь механічні домішки з МОР необхідно видаляти.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Найбільш ефективними для очищення МОР від твердих часток являються очисні пристрої з використанням фільтрації. У Дніпровському державному технічному університеті розроблені установки для очищення рідин від твердих часток фільтрацією [5]. У розроблених пристроях застосовано очищення з використанням фільтрації через шар сипких пористих матеріалів. Особливістю фільтрувальної установки є фільтруюча перегородка у виді об'ємної пористої камери, обмеженої нескінченними фільтрувальними сітками, між якими розміщений шар сипкого пористого матеріалу. В якості фільтрувального матеріалу використовуються утворені тверді частки металообробки або інші широко розповсюджені сипкі пористі матеріали.

Для забезпечення високоякісної очистки мастильно-охолоджуючих рідин від забруднення твердими частками, утвореними металорізальними верстатами при обробці металів різанням запропоновано і розроблено нове очисне обладнання.

Очисний пристрій (рис.1) складається із корпусу 1, нагнітальної камери 2 з підвідним патрубком 3 і розвантажувальним вузлом 4, фільтрувальної перегородки 5, зливної камери 6 з відвідним патрубком 7. Фільтрувальна перегородка 5 виконана у виді пористої камери, обмеженої двома нескінченними сітками 8 і 9, що приводяться в рух системою блоків нижніх 10 і верхніх 11 барабанів, які мають незалежні приводи. Між нескінченними сітками 8 і 9 рівномірним шаром розташовується сипкий пористий матеріал 12 з живильника 13. Під розвантажувальним вузлом 4 встановлений

гравітаційний бак-відстійник 14 з скребковим конвеєром 15 і переливною трубою 16. Пристрій працює таким чином. Забруднена рідина поступає по підвідному патрубку 3 в нагнітальну камеру 2.

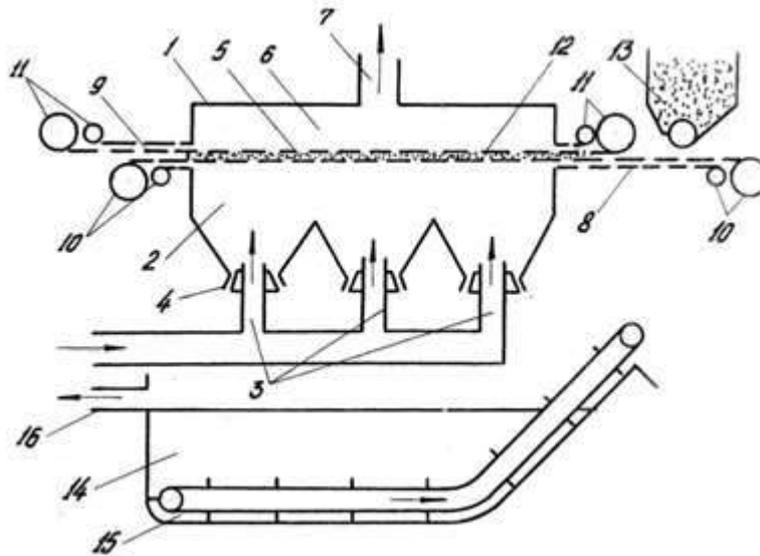


Рисунок 1 – Очисний пристрій

Рідина фільтрується через фільтрувальну перегородку 5 і із зливної камери 6 через патрубок 7 відводиться з пристрою. Тверді частки, швидкість витання яких більше швидкості потоку рідини, направляються на фільтрувальну перегородку 5. Оскільки розмір чарунки нижньої сітки 8 і діаметри капілярних каналів, утворених шаром сипкого пористого матеріалу 12, відповідні з діаметром твердих часток, то останні проникаючи у всередину фільтрувального шару 12, зависають і затримуються в ньому. Крупні тверді частинки швидкість витання яких менше швидкості рухомого вгору потоку рідини, опускаються під дією сил тяжіння вниз до розвантажувального вузла 4. Між циклами фільтрації рідини під час очищення нижньої сітки 8 від твердих частинок і утворення нових капілярних каналів у фільтрувальному шарі 12, що відокремилися і осіли тверді частки разом з частиною рідини через розвантажувальний вузол 4 потрапляють в гравітаційний бак-відстійник 14, звідки їх видаляють скребковим конвеєром 15, а рідина досявши певного рівня переливається через переливну трубу 16 в бак для подальшого очищення.

Процес очищення нижньої сітки 8 від твердих часток і утворення капілярних каналів у фільтрувальному шарі 12 здійснюється поперемінною зміною напрямку руху двох нескінченних сіток 8 і 9, в протилежні сторони при обертанні системи блоків нижніх 10 і верхніх 11 барабанів. Подача і розміщення фільтрувального шару з сипкого матеріалу 12 проводиться живильником 13. Зміна фільтрувальної перегородки 5 здійснюється автоматично шляхом переміщення двох незалежних нескінченних сіток 8 і 9 в одному напрямі з подальшим вивантаженням сипкого пористого матеріалу із

завислими твердими частками в спеціальну ємність для очистки сипкого матеріалу і подальшого його використання. В якості сипкого пористого матеріалу використовуються волокна текстилю, подрібнений піщаник, тверді частки шліфування.

Запропонований пристрій дозволяє автоматизувати процес очищення забрудненої рідини від твердих часток. Механізм очищення нижньої сітки від твердих часток з утворенням нових капілярних каналів у фільтрувальному шарі простий і надійний в роботі, забезпечує відновлення фільтрувальної системи по всій її площині, що дозволяє збільшити продуктивність в 3-5 рази, а ступінь очистки підвищити в 1,1-1,2 рази. Використання в якості фільтрувальної перегородки сипучих пористих матеріалів дає можливість відмовитися від дорогих фільтрувальних тканин і фільтрувального паперу, що дозволяє отримати значний економічний ефект.

Розроблений пристрій запропоновано для високоякісного очищення технологічних рідин від механічних включень і повного видалення цінної вторинної сировини із рідин (МОР) при мінімальних експлуатаційних витратах.

Поставлена мета досягається виконанням фільтрувальної перегородки у виді об'ємної пористої камери, обмеженої двома нескінченними фільтрувальними сітками, між якими рівномірним шаром розміщується сипкий пористий матеріал, і які приводяться в рух системою блоків нижніх і верхніх барабанів, що мають незалежні приводи.

Розроблений очисний пристрій доцільно застосовувати в системах експлуатації МОР для очистки технологічних рідин металорізальних верстатів від дрібної стружки і шламу.

Продуктивність фільтрувальної установки повинна забезпечувати продуктивність централізованої системи експлуатації МОР.

При використанні безкамерної фільтрувальної установки її параметри визначаються в наступній послідовності:

– вибирають діаметр сопла:

$$d_c = (15...25) \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad (1)$$

– встановлюють продуктивність сопла:

$$Q_c = (0,5...1,2) \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}; \quad (2)$$

– для заданої продуктивності $W_{\text{ж}}$ системи експлуатації МОР визначають кількість сопел в сопловій групі:

$$n_c = W_{\text{ж}} / Q_c; \quad (3)$$

– вираховують швидкість руху рідини v_c на виході із сопла:

$$v_c = (4 Q_c / \pi \cdot d_c^2) \cdot 10^{-3} \text{ м/с}; \quad (4)$$

– відстань від сопла до фільтрувальної перегородки вибирають в межах:

$$H = (40 \dots 60) \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad (5)$$

– визначаємо кут α_c розкриття струменя витоку рідини із сопла:

$$\alpha_c = (30^\circ \dots 45^\circ); \quad (6)$$

– визначаємо відстань між осями сопел:

$$L_c = (1,115 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} \cdot H) \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad (7)$$

– вираховуємо робочу поверхню фільтрувальної перегородки:

$$S_\phi = (L_c \cdot n_c \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} \cdot H) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad (8)$$

– вибираємо параметри фільтрувальної перегородки:

– так як фільтрувальна перегородка фільтрувальної установки складається із фільтрувальних сіток, між якими в якості фільтрувального шару використовуються тверді частинки металообробки або інші широко поширені фільтрувальні матеріали, то необхідно визначити параметри фільтрувальних сіток і параметри фільтрувального шару [6].

Для сіток з квадратними отворами живий перетин:

$$L = \frac{1}{1 + d_{др}/d_o} \cdot 100\%, \quad (9)$$

де $d_{др}$ – діаметр дроту, мм;

d_o – розмір отворів, мм.

Для сіток з прямокутними отворами розміром живий перетин:

$$L = \frac{d_o \cdot B}{(B + d_{др}) \cdot (d_o + d_{др})} \cdot 100\%, \quad (10)$$

де B – розмір більшої сторони отвору, мм;

– вибираємо параметри фільтрувальних сіток $d_{др}$, d_o і визначаємо живий перетин фільтрувальних сіток L .

– вираховуємо робочу поверхню фільтрувальної перегородки з урахуванням живого перетину фільтрувальних сіток:

$$S_{фж} = (L_c \cdot L \cdot n_c \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha_c}{2} \cdot H) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (11)$$

Продуктивність фільтрувальної установки залежить також від пористості фільтрувального шару фільтруючої перегородки. Пористість фільтрувального шару фільтруючої перегородки і тривалість процесу фільтрування рідини через фільтрувальний шар залежить від маси твердих часток, що зависають в порах сипкого пористого матеріалу фільтрувальної перегородки при фільтруванні рідини [7, 8].

Масу твердих часток, що осіли і зависли в порах каналів сипкого пористого матеріалу фільтрувальної перегородки у будь-який момент часу процесу фільтрації мастильно-охолоджуючої рідини з твердими частками металообробки визначаємо по формулі:

$$m_T = \kappa_3(1 - e^{-W_* \cdot t}), \quad (12)$$

де m_T – маса твердих часток, кг;

κ_3 – вхідна концентрація забруднень твердими частками, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Припускаючи, що зміна пористості пропорційна приросту маси твердих часток в пористому шарі фільтрувальної перегородки об'ємом W_ϕ , м^3 , отримуємо:

$$d\Pi = \frac{dm_T}{\rho \cdot W_\phi}, \quad (13)$$

де ρ – щільність пористого середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При фільтрації водно-шламових суспензій через фільтрувальну перегородку пористе середовище безперервно змінюється і зростає за рахунок твердих часток шламу [9]. Після підстановки у диференціальне рівняння нерозривності значення зміни пористості фільтрувальної перегородки та відповідних перетворень отримуємо диференціальне рівняння фільтрації рідини в перемінному пористому середовищі [10].

$$\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} + \Pi \frac{\rho \cdot g}{\alpha \cdot \mu \cdot \kappa_\phi} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\kappa_3 \cdot g \cdot W_* \cdot e^{-W_* \cdot t}}{\mu \cdot \kappa_\phi \cdot \rho \cdot W_\phi} = 0. \quad (14)$$

Диференціальне рівняння (14) дозволяє за заданих початкових і граничних умов отримати рішення задачі фільтрування рідини через шар твердих часток перемінного пористого середовища фільтрувальної перегородки в області часових $0 \leq t \leq T$ та просторових $0 \leq z \leq L$ значень.

$$P(z, 0) = P_1; (0, t) = P_1; P(L, t) = P_2. \quad (15)$$

Встановлюємо та визначаємо параметри фільтрування рідини в перемінному пористому середовищі:

– модуль пружності α пористого середовища, $\text{Н}/\text{м}^2$;

- початкову пористість Π фільтрувального шару фільтруючої перегородки, %;
- коефіцієнт динамічної в'язкості μ , Н·с/м²;
- коефіцієнт фільтрації k_f , м/с;
- вхідну концентрацію забруднень твердими частками k_z , кг/м³;
- тиск рідини в нагнітальній камері фільтрувальної установки P_n , Па;
- тиск рідини в зливній камері фільтрувальної установки P_z , Па;
- товщину фільтрувальної перегородки h , м;
- об'єм фільтрувальної перегородки W_ϕ , м³:

$$W_\phi = S_\phi \cdot h$$

По математичній залежності визначаємо продуктивність фільтрувальної установки на початку процесу фільтрації $W_{жп}$ та вкінці $W_{жк}$ протягом заданого часу T при безперервній експлуатації фільтрувальної перегородки площиною S_ϕ .

Визначаємо швидкість фільтрування рідини в перемінному пористому середовищі на початку процесу фільтрації $W_{жп}$ та вкінці $W_{жк}$:

$$v_{фп} = W_{жп} / S_{фж} ; v_{фк} = W_{жк} / S_{фж}.$$

По продуктивності фільтрувальної установки на початку процесу фільтрації $W_{жп}$ встановлюємо продуктивність гідравлічного насосу Q_n системи експлуатації МОР:

$$Q_n = (1,15...1,2) 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Запропонована методика розрахунку параметрів фільтрувальної установки дозволяє повністю вписатися в систему експлуатації МОР металорізальних верстатів і автоматизувати процес очистки МОР від твердих часток практично будь-якої в'язкості.

ВИСНОВКИ

В результаті впровадження розробок для систем експлуатації МОР та методик розрахунку їх параметрів відпадає необхідність в придбанні дорогих фільтрувальних матеріалів, збільшено термін експлуатації МОР в технологічному ланцюзі на 3%, збільшена стійкість різального інструменту на 6-8%, підвищена якість оброблюваних поверхонь.

Використання запропонованих високоефективних розробок фільтрувального обладнання забезпечує повне освітлення МОР і глибоке видалення твердих часток цінної вторинної сировини металообробки, зокрема для порошкової металургії, створює умови для організації безвідходного виробництва, підвищує рівень екологічної безпеки на ділянці експлуатації МОР.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Тихонцов О. М., Нечипоренко В. І., Коробочка О. М., Левчук О. М. Механізація трудомістких і допоміжних процесів в механічних цехах. Київ : Техніка, 1987. 160 с.

- [2] Тихонцов О. М. Допоміжне обладнання механічних цехів. Київ-Донецьк : Вища школа, 1982. 202 с.
- [3] Лавриненко В. І., Молчанов В. Ф., Солод В. Ю., Проц Л. О. Вплив твердих часток шламу на показники шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні і оцінка вірогідності виникнення подряпин на ній. *Надтверді матеріали*. 2019. Т 41, №6(224). С. 91-102.
- [4] Молчанов В. Ф. Дослідження впливу твердих часток на шорсткість поверхонь при шліфуванні методами теорії ймовірності. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. Дніпродзержинськ : ДДТУ. 2016. Вип. №1(28). С. 20-24.
- [5] Тихонцов А. М., Молчанов В. Ф., Цяпко Н. Ф., Меркушев А. А., Гилин В. Ф. Пристрій для очищення рідин: А.С. 1142139: кл. В 01 D 33/16 (№3609898/23-26). Заявл. 24.06.83; опубл. 28.02.85. Бюл. № 8. 5 с.
- [6] Молчанов В. Ф. Дослідження пропускнуої спроможності фільтрувальних сіток. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. Дніпродзержинськ : ДДТУ. 2012. Вип. 3(20). С. 61-65.
- [7] Молчанов В. Ф. Постановка нестационарної задачі фільтрування рідин в пористому середовищі. *Математичне моделювання. Науковий журнал*. 2014. №1. С. 28-30.
- [8] Молчанов В. Ф., Чернишов О. В. Постановка нестационарної граничної задачі фільтрації рідини у пористому середовищі. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*. Краматорськ : ДДМА, 2019. № 2(46). С. 150-154.
- [9] Молчанов В. Ф. Постановка та вирішення нестационарної граничної задачі фільтрації рідини у пористому середовищі. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Кам'янське : ДДТУ. 2018. Вип. №1(32). С. 53-58.
- [10] Молчанов В. Ф. Постановка нестационарної задачі фільтрування рідини у деформованому пористому середовищі. *Науковий журнал державного університету «Житомирська політехніка». Технічна інженерія*. 2020. №1(85). С. 66-70.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF INSTALLATIONS FOR COOLANT OPERATION SYSTEMS AND METHODS FOR CALCULATING THEIR PARAMETERS

Molchanov V. PhD, Associate Professor
Latyshev D.
Dniprovsky State Technical University / Ukraine

Abstract. The regularities of the process of filtration of technological liquids through porous materials are investigated and highly efficient installations for the operation of lubricating and cooling liquids are developed. It has been established that during operation, liquids are continuously and intensively contaminated with

solid particles of metalworking. To restore their properties, process fluids are cleaned of mechanical impurities. The most widely used methods of purifying process fluids are filtration. The use of filtration for the purification of process liquids is the most effective, since filtration through a layer of porous materials can achieve complete removal of solid particles from liquids.

The purpose of this work is to study the installations for cleaning lubricating and cooling liquids in mechanical workshops and to develop new highly efficient equipment for cleaning coolant of metal-cutting machines and methods for calculating their parameters.

As a result of the implementation of the developments for coolant operation systems and methods for calculating their parameters, the service life of coolant in the technological chain was increased by 3%, the durability of cutting tools was increased by 6-8%, and the quality of machined surfaces was improved. The use of the proposed highly efficient developments of filtering equipment provides complete clarification of coolant and deep removal of solid particles of valuable secondary raw materials of metalworking, in particular for powder metallurgy, creates conditions for the organisation of waste-free production, increases the level of environmental safety at the coolant operation site.

Keywords: technological liquids; solid particles; filtration; filtering plants; porous materials; calculation method.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
30.01.2025 р.	29.04.2025 р.	21.06.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-05>
УДК 658.518.5

Пальчевський Б. О.
д-р, техн., наук, професор
ORCID: 0000-0002-4000-4992

Луцький національний
технічний університет / Україна

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПРОЦЕСУ ДЕГРАДАЦІЇ СТАНУ ПАКУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Анотація: прогнозне технічне обслуговування (PdM) – це стратегія технічного обслуговування на основі стану, яка покладається на моніторинг обладнання в режимі реального часу з метою виконання дій з технічного обслуговування саме тоді, коли це необхідно, уникаючи непотрібних профілактичних заходів. Це дослідження має на меті розробити комплексну методологію PdM, яка об'єднує оцінку залишкового терміну корисного використання (RUL – *remaining useful life*) технологічного обладнання (ТО) та його основних механізмів шляхом аналізу процесу деградації їх стану. З цією метою пропонується оснастити ТО системою постійного моніторингу для постійного автоматичного збору та обробки статистичних даних з поточної експлуатації ТО та інших діагностичних параметрів, що супроводжують роботу машини (вібрації, струми, звук, температура, продуктивність, частота відновлення працездатності тощо). Збір даних у поєднанні з програмним забезпеченням дає змогу перетворити їх в режимі реального часу в історію процесу деградації і в результаті аналізу визначати, чи є суттєві зміни, які вказують на наявність дефекту у виробничому процесі, а також конкретизувати вимоги до видів та термінів технічного обслуговування. Пропонується алгоритм для моделювання процесу деградації та оптимізації графіка технічного обслуговування промислового обладнання на основі моделей деградації та експертної системи (ЕС) для підтримки прийняття рішень на основі RUL для визначення оптимального часу для технічного обслуговування. Особливістю методики дослідження стану ТО є її двоетапне виконання: на першому етапі досліджується технічний стан ТО як цілого, а на другому – її механізмів. Саме на другому етапі визначаються механізми, що вимагають проведення технічного обслуговування, а також вид цього обслуговування. Цей методологічний підхід не тільки збільшує інтервали між операціями технічного обслуговування, але також оцінює технічний стан основних механізмів, що підвищує ефективність роботи та мінімізує дорогий час простою. Ключова особливість цієї дослідницької роботи полягає в її реальній застосовності для ТО з декількома механізмами, оскільки ефективність запропонованої основи оцінюється в рамках реальної виробничої системи пакувального виробництва.

Ключові слова: прогнозне технічне обслуговування (PdM), компонент моніторингу стану, прикладне дослідження, RUL – remaining useful life.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Результатами роботи системи моніторингу при прогнозному технічному обслуговуванні є постійна оцінка технічного стану ТО (технологічного обладнання) і його механізмів. Постійний моніторинг стану працюючого ТО у виробничих умовах шляхом безперервного автоматичного збирання інформації надає можливість оцінити швидкість деградації технічного стану ТО та зношування його деталей, конкретизувати RUL, визначити вимоги до видів та термінів технічного обслуговування. Спрогнозувати наближення відмови за допомогою ручного аналізу даних – практично нерозв'язне завдання. Тому справжня цінність автоматичного моніторингу полягає не в зборі необроблених даних, а в перетворенні цих даних у корисну інформацію, необхідну для керування процесом деградації ТО з метою підвищення його експлуатаційної надійності та оптимізації технічного обслуговування.

Моделі оцінки RUL класифікуються на два широкі типи моделей, а саме:

- моделі оцінки RUL, засновані на даних подій;
- моделі оцінки RUL, засновані на даних стану машини.

Під даними про події ми маємо на увазі минулі зареєстровані дані про несправності. Дані стану машини теж є важливим джерелом інформації. Такі дані дуже різноманітні, наприклад дані про вібрацію, дані аналізу масла, температуру, тиск, вологість, вологість, дані про навантаження, швидкість та навколишнє середовище тощо.

Відзначимо, що керована даними діагностика несправностей і прогнозування відмов ТО у виробничих умовах базується часто на числових даних датчиків. Інші дані, такі як періоди безвідмовної роботи, тривалості відновлення працездатності, конкретний механізм, що відмовив, часто відкидаються через складність визначення цих показників в автоматичному режимі. Однак для складних технічних систем, до яких відноситься і більшість ТО дискретного виробництва, де деградація розвивається повільно, ці дані можуть запропонувати важливе розуміння процесу розвитку несправностей, що спростить діагностику ТО. Зокрема, у задачі кількісного визначення рівня деградації перевірених компонентів ТО та їх RUL можна отримати важливу інформацію. Таким чином, у цьому дослідженні представлено метод, що ґрунтується на двоетапній методиці оцінки RUL ТО та його механізмів, заснованій на даних подій, аналізі отриманих даних і їх використання за допомогою вбудованої ЕС для оптимізації видів та термінів проактивного технічного обслуговування ТО та його механізмів.

Прогнозне технічне обслуговування стало важливою стратегією в різних галузях промисловості, спрямованою на оптимізацію ефективності використання технологічного обладнання (ТО), підвищення його продуктивності шляхом зменшення часу простою та підвищення коефіцієнту використання [1, 3]. Застосування моніторингу стану за допомогою методів збору даних спричинили у сфері прогнозного технічного обслуговування, перехід від звичайних підходів, заснованих на моделях, до методології,

керованої даними [2]. Тенденція до повністю автоматизованого визначення стану ТО в реальному часі вимагає оцінки його надійності в режимі реального часу, зводячи до мінімуму втручання людини. Однією з головних проблем є складність використання контрольованих методів для автоматичного отримання даних про несправності ТО і його простої для відновлення працездатності [4]. Тому останнім часом зростає увага до безперервного онлайн-моніторингу у промислових умовах [7], [8].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Деякі дослідники пропонують визначати період технічного обслуговування обладнання шляхом аналізу зміни інтенсивності його відмови в процесі функціонування і врахування різниці в витраті ресурсу [5]. Інші дослідники визначають оптимальний період технічного обслуговування обладнання шляхом пошуку періоду технічного обслуговування, який забезпечує мінімальні питомі непродуктивні витрати об'єкту [6]. Загальним недоліком цих способів є вузька сфера їх застосування, бо вони спрямовані на об'єкти, для котрих допустимо вважати постійною інтенсивність відмов по всьому інтервалі часу витрачання обмеженого ресурсу.

Ряд дослідників пропонують визначати оптимальний період технічного обслуговування об'єкту за комплексним критерієм, який забезпечує мінімум питомих непродуктивних витрат ресурсу з врахуванням зміни характеристик надійності об'єкту в процесі експлуатації і ймовірність безвідмовної роботи об'єкту за час його активного функціонування [2], або за мінімумом середньої питомої непродуктивної витрати ресурсу та максимумом коефіцієнта готовності об'єкту [3].

Недоліком цих підходів є те, що при багатокритеріальній оптимізації знаходиться деяке компромісне рішення, яке, як правило, не дає екстремальних значень жодного з показників якості технічного стану обладнання, що використовуються для аналізу процесу деградації і визначення залишкового ресурсу. Зведення показника процесу деградації до однокритеріального призводить до необхідності введення вагових коефіцієнтів, що відображають ступінь важливості кожного з показників. Числові значення коефіцієнтів визначаються зазвичай експертним шляхом і мають значною мірою інтуїтивний характер. У зв'язку з цим точність визначення оптимальних значень періоду обслуговування та інших вихідних величин може бути низькою

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

На сьогодні існує потреба в подальшому дослідженні методів, які можуть забезпечити виявлення несправності або ненормальних умов, в вигляді поточкових часових рядів даних

Задача, на розв'язання якої направлена розглянута методика, є визначення обґрунтованого значення допустимої величини інтенсивності відмови для оцінки залишкового ресурсу (RUL) для ТО в цілому на першому етапі і оцінки RUL його механізмів на другому етапі. Такий підхід дозволяє здійснити ранжування механізмів по величині RUL і сформування експертне

заключення про доцільність, вид та терміни проведення технічного обслуговування та/або ремонту відповідного механізму ТО.

Дослідження зосереджено на важливості виявлення несправностей і технічного обслуговування на основі стану (PdM) у пакувальній промисловості, використовуючи систему виявлення та аналізу відмов та простоїв обладнання для прогнозування його подальшого стану та своєчасного обслуговування. Важливим при цьому є автоматичне отримання і аналіз даних, підвищенні глибини їх аналізу при моніторингу обладнання. Більше того, розвиток пакувальної галузі полягає в розробці інноваційних сенсорних технологій контролю стану ТО і його механізмів вимагає підвищення точності та масштабності збору даних. Це забезпечує більш складну аналітику, тим самим сприяючи створенню розширених прогнозних моделей відмов за допомогою покращеного збору й аналізу даних.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основне завдання, яке виникає при проведенні аналізу технічного стану ТО, є розрізнення звичайної швидкості його деградації від небезпечної швидкості деградації. Це вимагає проведення постійного автоматичного моніторингу стану ТО на основі постійного збору різноманітних даних про роботу обладнання, такі як історія обслуговування та ремонтів, показники датчиків (температура, тиск, вібрація, тощо), дані про виробничий процес (обсяг продукції, швидкість роботи, тощо).

Показниками виникнення небезпечної швидкості деградації ТО є суттєве зниження його продуктивності, тривалості періодів безвідмовної роботи, значення інтенсивності відмови чи коефіцієнту використання ТО. Для підвищення точності оцінки стану ТО і його функціональних механічних та електричних компонентів доцільно використати ключові діагностичні параметри, тобто здійснити контроль температури, вібрації, тиску та шуму в робочій зоні, а також, при можливості, здійснити лабораторний аналіз наявності металевих часток у мастильних матеріалах або вибрати інші показники механічного зношування.

Для аналізу поточного технічного стану ТО використовують при моделі оцінки RUL, заснованій на даних подій, такі діагностичні ознаки:

1. Час напрацювання ТО до відмови.
2. Час відновлення працездатності.
3. Вказівку на механізм, що відмовив.

Для аналізу технічного стану за допомогою моделі, заснованій на даних стану машини, як правило, використовують:

1. Коливання потужності головного електроприводу.
2. Температура в робочій зоні ТО.
3. Середньоквадратичні значення та спектр вібрації в робочій зоні ТО.
4. Середньоквадратичні значення та спектр рівня шуму в робочій зоні ТО.
5. Коливання тиску і витрати стисненого повітря тощо.

Отримані дані надходять на вхід системи діагностики обладнання, а на виході виходять розраховані оцінки показників технічного стану обладнання, виявлені симптоми відмов та несправностей його механізмів (як фактичні, так

і прогнозні), а також генеруються повідомлення, на основі яких запускаються відповідні процедури технічного обслуговування.

Прогнозне технічне обслуговування ТО із множиною механізмів за результатом оцінки RUL ТО і його механізмів реалізують в виробничих умовах наступним чином. При роботі обладнання здійснюють постійний технічний моніторинг, під час якого фіксують періоди безвідмовної роботи обладнання і тривалості відновлення його працездатності, а також фіксують механізм, що відмовив. При кожній відмові зупиняється робота обладнання і його механізмів, фіксується час безперервної роботи до відмови, механізм, що відмовив і тривалість відновлення його працездатності. Результати спостереження за роботою обладнання в режимі постійного моніторингу фіксуються в блоці збору даних (рис.1).

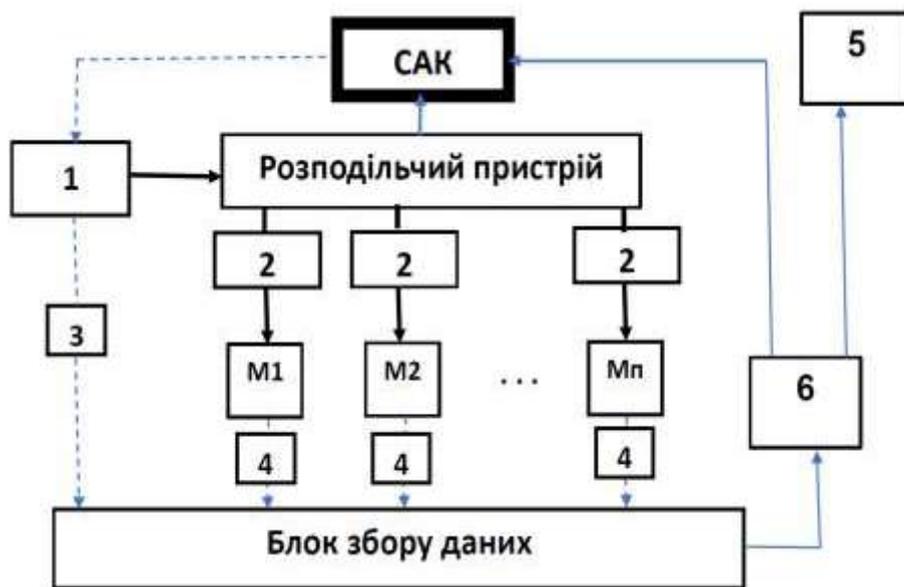


Рисунок 1 – Структурна схема пристрою, що реалізує спосіб прогнозного технічного обслуговування технологічного обладнання із множиною механізмів, де: САК – система автоматичного контролю і діагностики обладнання; 1 – загальний привід обладнання; 2 – локальні приводи чи передавальні пристрої механізмів; 3 – датчик загального приводу обладнання; M1, M2, ..., M_n – механізми обладнання; 4 – датчики руху механізмів; 5 – блок візуалізації; 6 – блок обробки даних

Для прогнозування деградації технічного стану ТО необхідно розробити математичні моделі, придатні для визначення величини залишкового ресурсу (RUL – remaining useful life) як для ТО, так і для його механізмів. Використовувані цифрові моделі обладнання можуть складатися з кількох підмоделей його механізмів, для кожного з яких може здійснюватися спеціалізований моніторинг його стану. Мірою деградації є розрахункова величина, що характеризує поточну здатність належного виконання заданих

функцій. Її чисельне значення корелює з ймовірністю відмови у конкретний момент часу.

Побудова індексу деградації може проводитися шляхом використання декількох показників стану ТО (залишковий ресурс R , або коефіцієнт використання ТО КГ, або інтенсивність відмови λ) або використання комплексного індексу деградації, який інтегровано описує вплив різних факторів на швидкість деградації. Такий індекс може включати такі фактори, як температура, вібрація, частота простоїв тощо шляхом встановлення датчиків та систем IoT (Інтернету речей) для моніторингу стану обладнання в реальному часі.

При використанні як індексу деградації залишкового ресурсу R вираз для оцінки швидкості деградації:

$$V_{\text{дегр}} = \frac{dR}{dT}, \quad (1)$$

де $V_{\text{дегр}}$ – швидкість деградації;

R – залишковий ресурс (RUL – remaining useful life) ТО;

t – час.

У цих методах значення RUL конкретного елемента в конкретному середовищі обчислюється з урахуванням вимірюваної або передбачуваної деградації.

Для вирішення значення RUL конкретного елемента (ТО та його механізмів) слід розробити алгоритм, який буде відстежувати деградацію в режимі реального часу, постійно оновлюючи лінію тренду і прогнозуючи час, що залишився до граничного стану. У такій моделі як входи можуть використовуватися всі типи сигналів, у тому числі спостережені за датчиками, розраховані та прогнозовані за результатами аналізу експлуатаційних даних.

Задача, яка виникає на початкових етапах дослідження, це визначення показників деградації ТО, придатних для керування процесом деградації і пов'язаним з ним процесом PdM. Ця задача включає:

– вибір показників стану ТО, придатних для контролю та для керування процесом деградації, який часто називають індекс деградації;

– визначення і обґрунтування допустимих значень цих показників.

Аналіз праць дослідників з методики визначення стану ТО, розглянутий вище, показав доцільність в якості такого показника вибрати інтенсивності відмови λ . В загальному випадку функція інтенсивності відмов визначається як:

$$\lambda(t) = \lambda_0 \alpha t^{\alpha-1}. \quad (1)$$

При $\alpha = 1$ функція ризику дорівнює константі, що відповідає нормальній експлуатації ТО; при $\alpha < 1$ функція ризику зменшується (приробка ТО); при $\alpha > 1$ функція ризику збільшується (старіння ТО). Саме визначення показника α характеризує стан ТО, а динаміка його зміни надає прогноз про наближення

відмови і дозволяє оцінити залишковий ресурс ТО і його механізмів, а також сформулювати експертне заключення про доцільність та терміни проведення їх технічного обслуговування та/або ремонту.

Друга задача, а саме визначення обґрунтованого значення допустимої величини інтенсивності відмови λ здійснюється із наступних міркувань. Аналіз процесу деградації ТО дозволяє розрізнити два види мінливості досліджуваного показника експлуатаційної надійності обладнання – інтенсивності відмови. Перший вид мінливості інтенсивності відмови - це власна мінливість, спричинена дією випадкових причин, якими супроводжується робота будь-якого виробничого обладнання. Ці причини складно чи неможливо виявити, сила впливу кожної окремої причини на загальний результат дуже мала. Проте всі разом викликають власну мінливість результатів процесу деградації. Другий вид мінливості – це мінливість, спричинена спеціальними невідповідними причинами. Ці причини викликають реально відчутні зміни у процесі деградації. Для того, щоб на тлі власної мінливості інтенсивності відмови в деградаційному процесі виявити мінливість, що викликається особливими причинами використовується верхня контрольна межа (ВКМ) інтенсивності відмови, що задає його допустиме значення. Порушення цієї межі статистичним показником експлуатаційної надійності є свідченням впливу особливих причин і виходу процесу деградації з керованого стану (рис. 2).

Діаграма процесу деградації стану ТО – це графік, де по осі x – час спостереження, а по осі y – значення індексу деградації – λ . Якщо дані розташовані хаотично навколо центральної лінії без явного тренду, то процес є стабільним, і збої є випадковими. Якщо ж спостерігається тренд постійного зростання чи спаду метрики – це ознака зношення або накопичення дефектів.

Оскільки при дослідженні процесу деградації ТО неможливо отримати в конкретний момент часу спостереження більш за одне значення параметру його експлуатаційної надійності – інтенсивності відмови, доводиться аналізувати і управляти процесом на основі індивідуальних значень альтернативних даних. Альтернативні дані для обчислення вибірових статистичних показників отримують у результаті розподілу результатів досліджуваного процесу на дві групи: ті, що відповідають вимогам, та ті, що не відповідають вимогам. При дослідженні надійності обладнання ці дані представляють собою наявність чи відсутність відмов і збоїв та їх характеристик. При використанні індивідуальних значень контрольні межі розраховують на основі міри варіації, отриманої по ковзних розмахах зазвичай двох послідовних спостережень.

Ковзний розмах – це абсолютне значення різниці вимірів в послідовних парах, тобто різниця першого і другого вимірів, потім другого і третього, і так далі, тобто:

$$R_i = \lambda_{i-1} - \lambda_i. \quad (2)$$

Число ковзних розмахів на 1 менше, ніж загальна кількість вимірних значень N , обсяг вибірки N умовно розглядається рівним 2 одиницям. На

основі ковзних розмахів обчислюють середній ковзний розмах $R_{\text{сер}}$, який використовують для аналізу процесу деградації. За всіма даними обчислюють загальне середнє $\lambda_{\text{сер}}$ Формули для розрахунку верхньої контрольної межі (ВКМ) при використанні індивідуальних значень статистичного показника інтенсивності відмови та ковзного розмаху наступна:

$$\text{ВКМ} = \lambda_{\text{доп}} = \lambda_{\text{сер}} + 3R_{\text{сер}}/d_2. \quad (3)$$

Для розрахунку ВКМ визначають середнє значення інтенсивності відмови за результатами моніторингу по моменту проведення дослідження:

$$\lambda_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \sum_i \lambda_i. \quad (4)$$

Середній ковзний розмах складе:

$$R_{\text{сер}} = \frac{1}{N-1} \sum_i R_i. \quad (5)$$

Значення ВКМ (верхня контрольна межа), яке задає гранично допустиме значення інтенсивності відмов $\lambda_{\text{доп}}$, визначиться за формулою, впровадженою Шухартом для аналізу його контрольних карт:

$$\text{ВКМ} = \lambda_{\text{сер}} + \Delta\lambda_t = \lambda_{\text{сер}} + \frac{3}{d_2} R_{\text{сер}} = \lambda_{\text{сер}} + \frac{3}{1,128} R_{\text{сер}}. \quad (6)$$

Значення коефіцієнту d_2 для вибірки обсягу $n=2$ складає 1,128 (Міжнародний стандарт ISO 8258-91 під назвою «Контрольні карти Шухарта»).

Використання ВКМ інтенсивності відмови дозволяє здійснити аналіз процесу деградації технічного стану обладнання і виявити ступінь наближення реального значення інтенсивності відмови до допустимого, що визначає RUL ТО як час, що залишився до переходу обладнання в стан, при якому воно потребуватиме ремонту або заміни [9] (рис. 2).

Методика дослідження стану ТО проводиться в два етапи: на першому етапі досліджується технічний стан і RUL ТО як цілого, а на другому – її механізмів. Саме на другому етапі визначаються механізми, що вимагають проведення технічного обслуговування, а також вид цього обслуговування.

Якщо зміни в процесі деградації обладнання спричинені особливими причинами, то вони реєструються на графіку процесу деградації як викиди значень інтенсивності відмови за контрольну межу ВКМ (рис. 3). При перетині на графіку динаміки інтенсивності відмови отримуємо час, коли необхідно здійснити технічне обслуговування або ремонт обладнання через недоцільність його подальшої експлуатації. Якщо в результаті технічного моніторингу буде визначено, що обладнання не може експлуатуватися надалі

через відсутність залишкового ресурсу, то через наявність в структурі технологічного обладнання множини механізмів додатково досліджують за даними моніторингу розвиток деградаційних процесів зміни інтенсивності відмов в кожному з механізмів, визначають їх гранично допустимі значення шляхом розрахунку верхньої контрольної межі, після чого перевіряють наявність перетину реальним значенням інтенсивності відмови кожного механізму з відповідною контрольною межею та визначають тривалість залишкового ресурсу механізму. Після цього проводять співставний аналіз деградаційних процесів для кожного з механізмів обладнання, визначають механізми з критичним значенням залишкового ресурсу та розробляють для них експертне заключення про необхідний вид та терміни технічного обслуговування або про можливість продовження безпечної експлуатації.

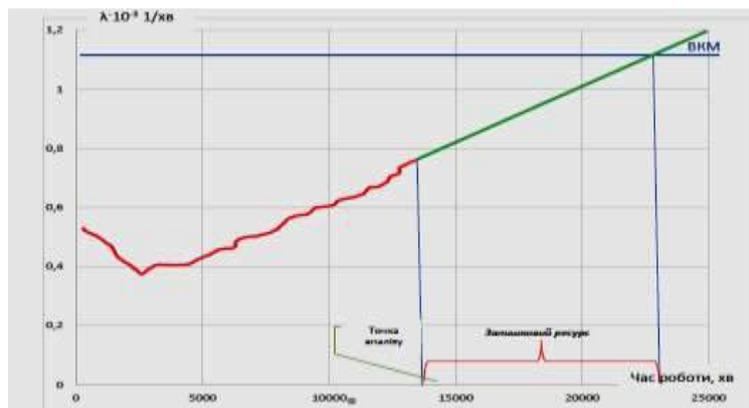


Рисунок 2 – Приклад визначення RUL TO при аналізі динаміки процесу деградації

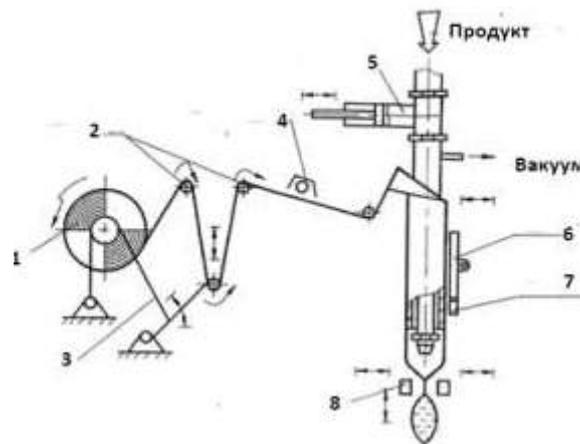


Рисунок 3 – Технологічна схема ТО для пакування рідкого продукту:
1 – плівка, 2 – направляючий валок, 3 – гальма, 4 – бактерицидна лампа,
5 – дозатор, 6 – механізм поздовжньої зварки, 7 – дататор, 8 – механізм поперечної зварки і відрізання пакету

Якщо ж графік зміни інтенсивності відмови тільки наближується до ВКМ як це показано на рисунку 2, то при апроксимації залежності до перетину з ВКМ отримуємо величину RUL як час, що залишився до проведення технічного обслуговування або ремонту обладнання.

Постійний автоматичний моніторинг стану – це автоматичне відстеження та оцінка поточного стану обладнання на основі постійного збору даних про тривалості періодів безвідмовної роботи і тривалості відновлень на протязі тривалого часу, автоматичне виявлення змін інтенсивності відмови обладнання і його механізмів, зниження продуктивності і коефіцієнту використання. Крім того, система діагностики здійснює автоматизовану передачу інформації щодо стану обладнання та відмов у систему технічного обслуговування для запуску необхідних процесів обслуговування. Результатами роботи системи проактивного керування процесом деградації є біжуча прогнозна оцінка технічного стану технологічного обладнання і його механізмів, яка дозволяє приймати рішення про технічне їх обслуговування чи ремонт, а також терміни проведення. Для вирішення цього завдання слід розробити алгоритм, який буде відстежувати деградацію в режимі реального часу, постійно оновлюючи лінію тренду і прогножуючи час, що залишився до граничного стану.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Ефективність запропонованого методу досліджується за допомогою реального промислового прикладу – машини для автоматичного пакування молока в пакети, де оцінка рівня деградації машини покращується за допомогою даних постійного моніторингу. Розглянемо як приклад машину для автоматичного пакування молока в пакети (рис. 3). Вона складається з поршневого дозатора для введення молока в пакет, механізму протягування рукава на крок, механізму поздовжнього зварювання, механізму поперечного зварювання з відрізанням пакета, механізму рукавоутворювача та пневмосистеми машини.

Машина працює в такий спосіб. Полімерна плівка 1 періодично змотується з рулону, простягається через систему валиків 2 і подається на рукавоутворювач, де згортається в рукав. Краї плівки в рукаві накладаються одна на одну і зварюються за допомогою механізму зварки 6 поздовжнього шва. Рукав і плівка періодично протягуються на крок за допомогою кліщових притисків 8, які одночасно зварюють рукав в поперечному напрямку і відрізають від нього заповнений пакет.

Пакувальне обладнання складається з механічних, пневматичних, електронних і термічних систем. Параметри, які характеризують несправний стан обладнання: зниження точності дозування рідини або пасти, погіршення герметизації через нещільність зварних швів, що призводить до збільшення кількості дефектних пакетів. Ці та інші несправності викликають зменшення продуктивності через збої чи відмови, які створюють затримки для їх усунення.

Практика аналізу причин відмов і збоїв визначається типовими джерелами несправностей:

– Стан ущільнювачів і нагрівальних елементів, оскільки вони відповідають за якість герметизації пакетів.

– Робота насосів і дозаторів, які забезпечують точність порційного пакування.

– Механічний знос рухомих частин (наприклад, приводних механізмів, направляючих, валів).

Проведений хронометраж роботи та простоїв автомата показав наявність типових відмов, а саме:

- удари механізму поперечного зварювання на верхню опору;
- сильний стукіт механізмів;
- надмірне розсіювання дози препарату;
- неякісний поздовжній шов;
- неякісний поперечний шов;
- складання плівки з поперечним швом, погане протягування плівки на рукавоутворювачі.

Для проведення аналізу надійності роботи автомата необхідно забезпечити наступні потенційно доступні дані:

- дані про роботу обладнання протягом усього терміну роботи обладнання з моменту запуску до моментів відмови;
- дані про час відновлення роботи обладнання;
- інформація про допустимі значення (контрольні межі) для окремих сигналів або індикаторів технічного стану, досягнення яких сигналізує про вихід з ладу.

Ці дані формуються в діаграмі наступного виду (табл. 1). В табличній діаграмі наведено результат спостереження за роботою ТО на протязі 52 робочих змін або 24960 хв. Перший стовпчик – це послідовність відмов машини, що має 6 працюючих механізмів. Якщо відмовив будь-який механізм, то робота машини зупиняється і здійснюється відновлення цього механізму. Машина в цей час простоє. В таблиці позначено індексом 1 – дозатор, 2 – механізм переміщення плівки, 3 – механізм поздовжньої зварки, 4 – механізм поперечної зварки і відрізання пакету, 5 – рукавоутворювач, 6 – пневмосистема машини, а наявність їх відмов – S_1, S_2, \dots, S_6 відповідно.

Тривалість періодів безвідмовної роботи, тривалість усунення точно фіксувалися (табл. 2). Загальні умови спостереження за роботою пакувального автомату:

- запланований робочий час для спостереження: 24960 хв;
- сумарний час простоїв за час спостереження 2045 хв;
- чистий робочий час за час спостереження 22954 хв.

Аналіз даних таблиці здійснюється наступним чином:

1. В виробничих умовах заповнюють таблицю даних спостереження за роботою машини: у стовпчику А вказано це номер відмови (в таблиці це від 1 до 95), у стовпчику В – тривалість безперервної роботи (в хвиликах) машини до її зупинки через відмову, у стовпчику С сумують періоди безвідмовної роботи машини між відмовами – це здійснюється накопичення часу роботи машини. В стовпчику Е вказується час відновлення працездатності машини, наприклад її ремонт чи щось подібне. В стовпчиках G, H, J, L, M, N позначені

детально, який з механізмів відмовив (фактично жирна крапка це, по суті, має бути одиничка, в чиста клітинка – нуль).

Таблиця 1 – Діаграма результатів спостереження за роботою 6-ти механізмів пакувального автомату (рис. 3) на протязі 52 робочих змін

№ відмови	Напряцювання на відмову, хв	Сумарна тривалість роботи, хв	Інтенсивність відмови автомату $\lambda \cdot 10^{-3} \text{ 1/хв}$	$\Delta D = D_i - D_{i-1}$	Тривалість відновлення, хв	Механізм автомату, який відмовив						
						Дозатор	Переміщення плівки	Поздовжня зварка	Інтенсивність відмови механізму 2	Поперечна зварка і відрізання	Механізм формування рукава	Пневмосистема
A	B	C	D	D1	E	G	H	J	K	L	M	N
<i>i</i>	t_i	$\sum t_i$	λ	$\Delta\lambda$	t_{bi}	S1	S2	S3	λ_2	S4	S5	S6
1	406	406	2,4	-	24	•						
2	339	745	2,6	0,2	12		•		1,35			
3	504	1249	2,4	0,2	15							•
...												
93	114	22541	4,1	0,1	22		•		1,3			
94	228	22769	4,15	0,05	21					•		
95	200	22969	4,15	0	18						•	

2. Далі починається обробка таблиці. В стовпчику D розраховують інтенсивність відмови машини за виразом:

$$\lambda = \frac{\text{кількість відмов (стовпчик A)}}{\text{сумарна тривалість роботи (стовпчик C)}} \cdot \quad (7)$$

3. За даними стовпчика D будемо графік залежності інтенсивності відмови машини λ від часу її сумарної тривалості роботи – стовпчик C.

4. Наступний крок – визначення ВКМ інтенсивності відмови, при перетині якої вже недоцільно її експлуатувати. Для цього доцільно використати методику, яку використав Шухерт при розробці своєї теорії контрольних карт для аналізу технологічних процесів на основі контролю індексу якості цього процесу. Вона дозволяє виявити і відділити такі види реальних змін в досліджуваному процесі, які виникають, коли зміни є наслідком деяких визначуваних причин, не притаманних процесу внутрішньо і повинні бути усунуті. До них можуть бути віднесені поломки інструменту чи ТО, недостатня однорідність матеріалу, промислового і контрольного обладнання, помилки персоналу тощо. Для їх визначення в контрольній карті Шухарта розраховують верхню і нижню контрольні межі (ВКМ і НКМ) індексу якості досліджуваного процесу. Таку методику доцільно використати і для процесу деградації стану ТО при умові, якщо існує вимірюваний індекс деградації.

В деяких ситуаціях аналізу процесів неможливо отримати більш за одне значення індексу якості процесу, наприклад значення показника продуктивності чи надійності ТО. Тоді аналіз процесу проводиться на основі

індивідуальних значень індексу якості. При використанні індивідуальних значень контрольні межі розраховують на основі міри варіації, отриманої по ковзних розмахах зазвичай двох послідовних спостережень. Ковзний розмах – це абсолютне значення різниці вимірів в послідовних парах, тобто різниця першого і другого вимірів, потім другого і третього, і так далі. Число ковзних розмахів на 1 менше, ніж загальна кількість вимірних значень N, обсяг вибірки n умовно розглядається рівним 2 одиницям. На основі ковзних розмахів обчислюють середній ковзний розмах $R_{сер}$, який використовують для побудови контрольних карт. За всіма даними обчислюють загальне середнє $\lambda_{сер}$. При розрахунку контрольних кордонів за виразом (6) використовуються коефіцієнти вибірки обсягу $n = 2$.

За результатами спостереження на протязі 52 робочих змін отримуємо наступну послідовність значень інтенсивності відмови ТО (табл. 2, стовпчик D).

Таблиця 2 – Інтенсивність відмов ТО за результатами спостереження

Показник	Значення для послідовних відмов ТО												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...
Інтенсивність відмови $\lambda \cdot 10^{-3}$ 1/хв	2,4	2,6	2,4	2,1	1,8	1,9	1,9	1,8	1,8	1,85	1,9	1,9	...
Ковзний розмах $R_{сер} \cdot 10^{-3}$ 1/хв		0,2	0,2	0,3	0,3	0,1	0	0,1	0	0,05	0,05	0	...

Визначимо середнє значення інтенсивності відмови:

$$\lambda_{сер} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (2,4 + 2,6 + 2,4 + 1,9 + \dots + 4,1 + 4,15 + 4,15) = 3,06 \cdot 10^{-3} \text{ 1/хв.}$$

Для визначення середнього ковзного розмаху в таблиці 2 після стовпчика D треба вставити стовпчик D1, в якому розраховується різниця двох сусідніх значень λ , тобто:

$$R_i = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (\lambda_{i-1} - \lambda_i). \quad (8)$$

Середній ковзний розмах складе:

$$R_{сер} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (0,2 + 0,2 + 0,3 + 0,1 + \dots + 0,05 + 0) = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ 1/хв.}$$

Значення ВКМ, яке вкаже на наявність наближення деградації машини, визначиться за формулою:

$$ВКМ = \lambda_{сер} + \frac{3}{d_2} R_{сер} = 3,06 + \frac{3}{1,128} 0,13 = 3,41 \cdot 10^{-3} \text{ 1/хв.}$$

Значення коефіцієнтів d_2 і $E_2=3/d_2$ отримані із таблиць для карт індивідуальних значень Шухерта при кількості вимірювань $n=2$ (Міжнародний стандарт ISO 8258-91 під назвою «Контрольні карти Шухарта»).

Тоді динаміка процесу деградації ТО набере вигляду (рис. 4).

Якщо в результаті технічного моніторингу буде визначено, що обладнання

не може експлуатуватися надалі через відсутність залишкового ресурсу, то через наявність в структурі технологічного обладнання множини механізмів додатково досліджують за даними моніторингу розвиток деградаційних процесів зміни інтенсивності відмов в кожному з механізмів, визначають їх гранично допустимі значення шляхом розрахунку верхньої контрольної межі, після чого перевіряють наявність перетину реальним значенням інтенсивності відмови кожного механізму з відповідною контрольною межею та визначають тривалість залишкового ресурсу механізму. Після цього проводять співставний аналіз деградаційних процесів для кожного з механізмів обладнання, визначають механізми з критичним значенням залишкового ресурсу та розробляють для них експертне заключення про необхідний вид та терміни технічного обслуговування або про можливість продовження безпечної експлуатації.



Рисунок 4 – Динаміка зміни інтенсивності відмови ТО

Другий етап аналізу технічного стану. Для виконання другого етапу аналізу виділимо із таблиці 1 дані, що стосуються механізмів машини – автомату і зведемо їх в таблицю 3. Основна складність у створенні системи прогнозного обслуговування – це розробка алгоритмів, здатних правильно визначити зародження дефекту та прогнозувати його подальший розвиток (рис. 5). Алгоритми діагностування та прогнозування можуть розроблятися не тільки для основних робочих вузлів обладнання (зварювальний вузол, шпиндель, фільтр, супорт, котел, турбіна, генератор чи трансформатор), але і для допоміжних вузлів (вузли живлення машини, вузли блокування, помпи тощо).

В блоках розміщено:

1 – Вхідні дані: тривалості спостереження, роботи і простоювань машини і індикація відмов основних функціональних механізмів.

2 – Розрахунок поточної інтенсивності відмови машини.

3 – Розрахунок середнього значення інтенсивності відмови.

4 – Добудова залежності інтенсивності відмови машини від часу спостереження.

5 – Розрахунок ковзного розмаху як двох сусідніх значень інтенсивності відмови.

- 6 – Розрахунок середнього ковзного розмаху.
- 7 – Розрахунок значення верхньої контрольної межі.
- 8 – Інтенсивність відмови перетинає верхню контрольну межу?
- 9 – Розрахунок поточної інтенсивності відмови механізмів машини.
- 10 – Розрахунок середнього значення інтенсивності відмови механізмів машини.
- 11 – Добудова залежностей інтенсивності відмови всіх механізмів машини від часу спостереження.
- 12 – Розрахунок ковзного розмаху як двох сусідніх значень інтенсивності відмови для кожного механізму машини.
- 13 – Розрахунок середнього ковзного розмаху для кожного механізму машини.
- 14 – Розрахунок значення верхньої контрольної межі для кожного механізму машини.
- 15 – Визначення механізмів, для яких регресія залежності інтенсивності відмов перетинає верхню контрольну межу.
- 16 – Розробка експертного заключення про необхідний вид технічного обслуговування відібраних механізмів та його проведення.

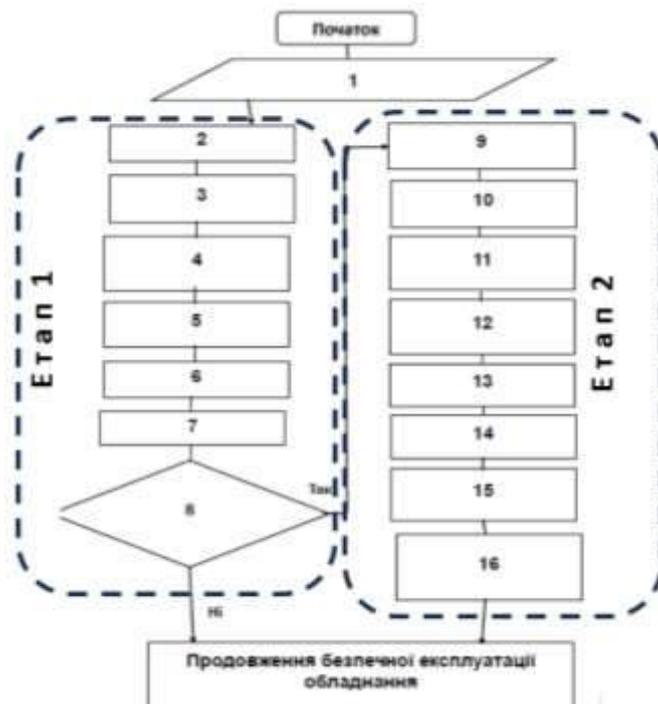


Рисунок 5 – Блок-схема виконання прогностичного технічного обслуговування неблагополучних механізмів технологічного обладнання

Результат аналізу значення інтенсивності відмови на всьому діапазоні спостереження, який проводився за даними таблиці 1 для основних механізмів ТО, дозволили провести ранжування індексу деградації і RUL для 6-ти механізмів. Найнижча надійність виявилася у механізмі 2 для

переміщення плівки. Для аналізу технічного стану цього механізму було розраховано значення ВКМ і побудовано графік його деградації, результати аналізу якого показали необхідність проведення відновлювальних робіт (рис. 6).

Таблиця 3 – Динаміка зміни інтенсивності відмови механізму переміщення плівки ТО

Показник	Значення сумарного напрацювання механізму 2												
	1900	3788	5672	7542	9432	11322	13191	15029	16918	18765	20627	22460	24960
Інтенсивність відмови $\lambda \cdot 10^{-3} 1/хв$	1,05	0,792	0,694	0,796	0,742	0,795	0,834	0,932	0,946	1,013	1,067	1,158	1,21
Ковзний розмах $R_{сер} \cdot 10^{-3} 1/хв$		0,258	0,098	0,102	0,054	0,053	0,039	0,098	0,014	0,067	0,054	0,091	0,052

Визначимо середнє значення інтенсивності відмови:

$$\lambda_{сер1} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (1,05 + 0,792 + 0,694 + 0,796 + \dots + 1,013 + 1,158 + 1,21) = 0,925 \cdot 10^{-3} 1/хв.$$

Середній ковзний розмах складе:

$$R_{сер} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{95} (0,258 + 0,098 + 0,102 + \dots + 0,091 + 0,052) = 0,0817 \cdot 10^{-3} 1/хв.$$

Значення НКМ, яке вкаже на наявність наближення відмови визначиться за формулою:

$$НКМ = 0,925 + \frac{3}{1,128} 0,0817 = 1,142 \cdot 10^{-3} 1/хв.$$

Значення коефіцієнтів d_2 і $E_2=3/d_2$ отримані із таблиць для карт індивідуальних значень Шухерта при кількості вимірювань $n=2$.

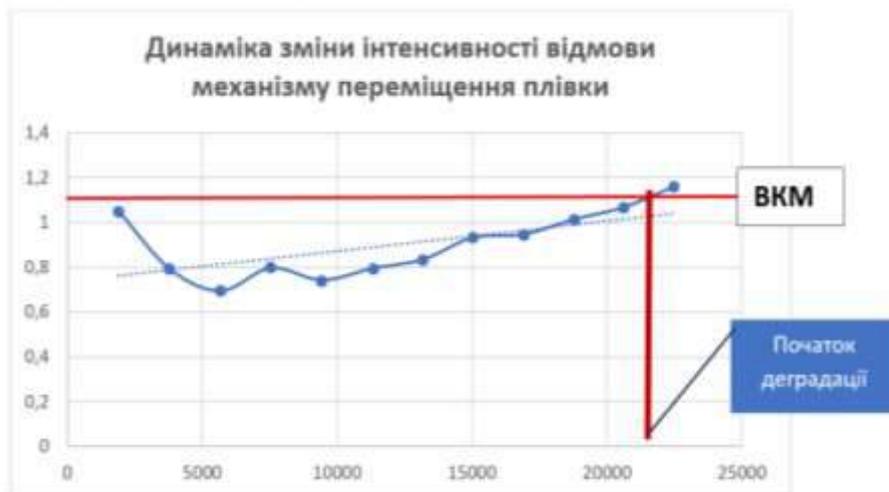


Рисунок 5 – Динаміка зміни інтенсивності відмови механізму 2 (переміщення плівки), визначена на другому етапі аналізу

ВИСНОВКИ

Моделі оцінки RUL є цінним інструментом у виробничій діяльності, оскільки вони забезпечують оптимізацію та підтримку прийняття рішень по технічному обслуговуванню ТО. Точність оцінки RUL є складним завданням, особливо в сучасних виробничих системах, оскільки складна та динамічна природа ТО вимагає надійного та постійного підходу для точного відображення тонкощів реальної системи. Залежно від результатів оцінки RUL основного ТО, процес перевірки повинен мати можливість виявити, чи потрібно провести технічне обслуговування або повторно вилучити деякі його частини, наприклад, окремі механізми, щоб правильно представити стан ТО у реальному світі.

У цій статті ми запропонували метод прогнозування, який зосереджений на підходах, керованих статистичними даними, що використовують лише наявні дані минулих спостережень і статистичні моделі. Для проведення процедур моніторингу і прогнозування багатокомпонентного ТО ми вважали, що відмови його компонентів є незалежними, адже при відновленні кожного з компонент простоює вся машина-автомат, отже потоки їх відмов зупиняються. Нами запропоновано таблична діаграма результатів спостережень, яка є основою для ієрархічного підходу до оцінки RUL багатокомпонентного ТО. В наведеному нами прикладі розглянута двоетапна оцінка RUL. Такий підхід дозволив здійснити двоетапний аналіз технічного стану ТО і прогнозування її залишкового терміну. Спочатку ми аналізуємо існуючі дані, здійснюємо оцінку поточного стану ТО, наприклад машини-автомату, і виявляємо чи існує необхідність технічного обслуговування ТО. Якщо це потрібно, то здійснюється другий етап, на якому здійснюємо оцінку поточного стану компонент (механізмів) ТО, проводиться їх ранжування за значенням RUL, яке дозволяє виявити ті з них, які найбільше впливають на зниження RUL ТО.

В подальшому для визначення конкретних причин відмов ТО доцільно використати модель симптомів відмов. Модель складається з кількох відмов, кожній з яких може бути задано один чи кілька симптомів. При цьому відмова ідентифікується за настанням хоча б одного симптому, або кількох з них (наприклад, двох із трьох), або всіх одночасно. Для підвищення якості прогнозу доцільно розширити перелік досліджуваних симптомів відмов, тобто знімати додаткові сигнали моніторингу в режимі онлайн за допомогою різних типів датчиків, що дозволяють уточнити технічний стан обладнання, наприклад сигнали вібрації, температури, струму двигуна, акустичного випромінювання тощо. Це спрощує формування графіку і передбачення часу технічного обслуговування обладнання на основі результатів моніторингу в реальному часі. Для аналізу моделі симптомів відмов в виробничих умовах можна скористатися побудовою експертної системи (ЕС) на основі використання специфічних знань експлуатаційного персоналу, технологів, механіків. Коли ми бачимо погіршення показників роботи, то розуміємо, що потрібно готуватися до відмови обладнання, і слід проводити ремонт виявлених ненадійних компонент.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Bousdekis, D. Apostolou and G. Mentzas. Predictive maintenance in the 4th

- industrial revolution: benefits business opportunities and man-agerial implications. IEEE Engineering Management Review, vol. 48, no. 1, pp. 57-62, 2020. DOI: 10.1109/EMR.2019.2958037
- [2] D. Jung and C. Sundstrom. A combined data-driven and model-based residual selection algorithm for fault detection and isolation. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 27, no. 2, pp. 616-630, 2017. DOI: 10.1109/TCST.2017.2773514
- [3] D. B. Durocher and G. R. Feldmeier. Predictive versus preventive maintenance. IEEE Industry Applications Magazine, vol. 10, no. 5, pp. 12-21, 2004. DOI: 10.1109/MIA.2004.1330766
- [4] E. F. Swana, W. Doorsamy and P. Bokoro. Tomek link and SMOTE approaches for machine fault classification with an imbalanced dataset. Sensors, vol. 22, no. 9, pp. 3246, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22093246>
- [5] S. Wickramasinghe, K. Amarasinghe, D. L. Marino, C. Rieger and M. Manic. Explainable unsupervised machine learning for cyber-physical systems. IEEE Access, vol. 9, pp. 131 824-13 143, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3112397
- [6] L. Yuanyuan and S. Jiang. Research on equipment predictive maintenance strategy based on big data technology. IEEE 2015 International Conference on Intelligent Transportation Big Data and Smart City, pp. 641-644, December 2015. DOI: 10.1109/ICITBS.2015.163
- [7] W. Yu, T. Dillon, F. Mostafa, W. Rahayu and Y. Liu. A global manufacturing big data ecosystem for fault detection in predictive maintenance. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 16, no. 1, pp. 183-192, 2021. DOI: 10.1109/TII.2019.2915846
- [8] Palchevskiy B., Krestyanpol L. Application of Predictive Maintenance in the Packaging Production. Informatyka, Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska – IAPGOS, № 3, 2022, pp. 27–33. DOI: 10.35784/iapgoss.3051
- [9] Jardine A.K. Review of Current Approaches for Defining the Remaining Useful Life of Mechanical Equipment, Mechanical Systems and Signal Processing, 20(4), 2006, pp.719-737.

IMPROVING PREDICTIVE MAINTENANCE BASED ON THE ANALYSIS OF PACKAGING EQUIPMENT CONDITION DEGRADATION PROCESS

Palchevskiy B. DThSc., Prof., Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. Predictive Maintenance (PdM) is a condition-based maintenance strategy that relies on real-time equipment monitoring to perform maintenance actions only when necessary, avoiding unnecessary preventive measures. This research aims to develop a comprehensive PdM methodology that integrates the assessment of the Remaining Useful Life (RUL) of technological equipment (TE)

and its main mechanisms by analyzing their condition degradation process. To this end, it is proposed to equip the TE with a continuous monitoring system for constant automatic collection and processing of statistical data from the current operation of the TE and other diagnostic parameters accompanying the machine's operation (vibration, currents, sound, temperature, performance, recovery rate, etc.). Data collection, combined with software, enables their real-time transformation into a history of the degradation process and, as a result of the analysis, to determine whether there are significant changes indicating a defect in the production process, as well as to specify the requirements for the types and timing of maintenance. An algorithm is proposed for modeling the degradation process and optimizing the maintenance schedule of industrial equipment based on degradation models and an expert system (ES) to support decision-making based on RUL for determining the optimal time for maintenance. A feature of the TE condition research methodology is its two-stage implementation: the first stage investigates the technical condition of the TE as a whole, and the second – its mechanisms. It is in the second stage that the mechanisms requiring maintenance and the type of maintenance are determined. This methodological approach not only increases the intervals between maintenance operations but also assesses the technical condition of the main mechanisms, which increases operational efficiency and minimizes costly downtime. A key feature of this research work lies in its real applicability to TE with multiple mechanisms, as the effectiveness of the proposed framework is evaluated within a real packaging production system.

Keywords: predictive Maintenance (PdM), Condition Monitoring Component, Applied Research, RUL – Remaining Useful Life.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
03.03.2025 р.	06.05.2025 р.	21.06.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-06>
УДК 621.7

¹ Повстяной О. Ю.
д-р, техн., наук, професор
ORCID: 0000-0002-1416-225X
² Русаков Д. С.
викладач-методист

¹ Луцький національний
технічний університет / Україна
² Ковельський промислово-
економічний фаховий коледж /
Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ШПОНУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ SOLIDWORKS

Анотація: обладнання для виробництва шпону. Це дозволить оптимізувати виробничу роботу із користю як для залучення додаткових інвестицій, так і для підтримання екологічного добробуту людини. Детальне вивчення процесу роботи автоматичної лінії дубового шпону, визначення основних недоліків в її роботі та методи їх усунення, а також основні методи оптимізації обладнання є актуальною в сучасних умовах виробництва. В роботі показано модернізацію корпусу гідроциліндра. Стаття показує розробку нових або перевірку існуючих пристроїв на придатність для використання в технології виготовлення деталей відповідної складності за допомогою сучасного програмного забезпечення SolidWorks.

Ключові слова: Шпон, оптимізація, гідроциліндр, SolidWorks.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У даний час дубовий шпон – найпопулярніший матеріал в меблевій промисловості. Головні переваги шпону – низька вартість і простота обробки.

Шпон – дерев'яний матеріал, що являє собою тонкі листи деревини. Якість пиляного шпону значно вища, ніж струганого. Пиляний шпон виключає можливість внутрішніх тріщин, які можуть призвести до розтріскування лицевої сторони паркету. Крім того, текстура пиляного шпону не відрізняється від текстури масивної дошки для підлоги.

Повноцінним сировиною для шпону є породи листяних дерев. Наявність гідрофобізуючих, антисептичних та інших добавок обумовлює міцність і довговічність матеріалу.

Простота в виробничому процесі, все виробництво полягає в правильній, якісній обрізці листів потрібного розміру матеріалу.

Для виготовлення шпону використовується шпонострогальних верстат. Для виробництва такого виду шпону часто використовують більш цінні породи дерев, які мають гарну текстуру – дуб, акація, горіх, червоне дерево, ясен, береза тощо. Цей вид шпону найбільш популярний, так як саме на ньому видно всю красу порід деревини. Кожен лист матеріалу має свою унікальну текстуру, завдяки тому, що при зрізі змінюються кути щодо поперечної або

поздовжньої заготовки. струганий шпон набув значного поширення в меблевому виробництві.

Лінія ламінування ДСП складається з безлічі основних і допоміжних систем, що забезпечують транспортування, позиціонування, підтримку необхідних температур, пресування, сортування готової продукції.

Пресування являється основним етапом у процесі формування ламінованої плити, під час якого відбувається склеювання плівки з зовнішніми шарами шпону. Процес склеювання відбувається одночасно по всій поверхні шпону за рахунок великої площі траверси преса. Опускання траверси відбувається за допомогою шести силових гідроциліндрів. Також в установці преса присутні додаткові гідроциліндри призначені для піднімання траверси преса.

Для забезпечення роботи преса, на ньому встановлені силові гідроциліндри які опускають траверсу преса, після того як основні гідроциліндри спрацювали, з витримкою в декілька секунд спрацьовують гідроциліндри які піднімають траверсу преса. Гідравлічна система опускання та піднімання преса являється замкнутою та має три джерела живлення, а саме регульовані насоси Н1, Н2 з вихідним тиском 40МПа та 20МПа і гідроакумулятор А1 для накопичення та вирівнювання рівномірності тиску в гідросистемі.

Основним недоліком преса є швидкий знос ущільнень притискних гідроциліндрів, відбувається підтікання масла через ущільнення що зумовлює втрату тиску в порожнині гідроциліндра, змінюється сила притискання по всій поверхні траверси преса. Також підтікання гідравлічної рідини, може спровокувати її попадання на поверхню ламінованої ДСП, що може відобразитись на якості її покриття.

Втрата тиску в гідроциліндрах може призвести до перекосу траверси преса, що зумовить появу надломів на деревостружковій плиті а також появи задирів та рисок на поверхні штоків гідроциліндра. Частий знос ущільнень потребує постійного технічного обслуговування, що потребує зупинку лінії на 2-3 дні, один день потрібен на охолодження преса, та 2 на розбирання та заміну ущільнень або штоків вартість яких є дуже висока. Це зумовлює значні економічні втрати на виробництві. Температура гідроциліндрів по всій поверхні не є рівномірною.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Вплив обробки, наприклад пресування плити, та його подальша оптимізація процесів виготовлення шпону представлена у [1, 2]. Тут проведено чисельне моделювання з формування, відкидання та деформації пресування шпону. Крім того, важливу роль в шпонуванні ДСП також відіграють пластифікатори, клеї тощо. Автори [3] вивчали застосування фенольних смол у формуванні шпону.

Комп'ютерні технології та моделювання широко використовуються в галузі виробництва та застосування деревини [4]. Найбільш часто використовуваною технологією для оптимізації є багат шарове сприйняття, природа якого як наближення універсальної функції робить його потужним

інструментом для моделювання складних зв'язків між змінними для оптимізації параметрів [5].

Метод Тагучі дозволив визначити ефект параметрів та вплив їх на оптимізацію [6]. Однак часто цього буває недостатньо для оцінки параметрів, дотримуючись єдиної функції оптимізації. У таких випадках використовуються методи оптимізації з кількома змінними.

Відповідаючи на ці потреби, концепція оптимізації роботи та вдосконалення агрегатів та вузлів пресувального обладнання для ДСП спрямована на оптимізацію роботи пропонує рішення, які необхідно прийняти на загальному рівні.

З огляду на це, інструменти оптимізації широко використовуються для підтримки ефективності і надійності рішення у виробничих та технологічних системах. Шляхом моделювання процесів прийняття рішень відповідно до критерії ефективності та обмеження, а також впровадження алгоритмів оптимізації можна підвищити продуктивність пресувального обладнання, одночасно зменшуючи витрати та вирішуючи проблему [7].

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

У ході визначення недоліків роботи гідроциліндрів було прийнято наступні завдання: встановити більш зносостійкі ущільнення для даного діапазону температур і внутрішнього тиску силових гідроциліндрів; здійснити повторний розрахунок розрахунок деформації корпусу гідроциліндра; провести розрахунок посадок для ущільнень; визначити основну причину такого зносу та виготовити новий гідроциліндр; провести економічне обґрунтування модернізації автоматичної лінії ламінування шпону.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Гідроциліндри піднімання служать для піднімання траверси преса після процесу ламінування. В спроектованому пресі їх встановлено 4. Основним недоліком даних гідроциліндрів являється відсутність їхньої синхронної роботи. Для ліквідації даного недоліку було спроектовано гідроциліндри із гідравлічною системою синхронізації. За основу для проектування було взято стару конструкцію гідроциліндрів. На рисунку 1 зображено нову конструкцію гідроциліндрів піднімання.

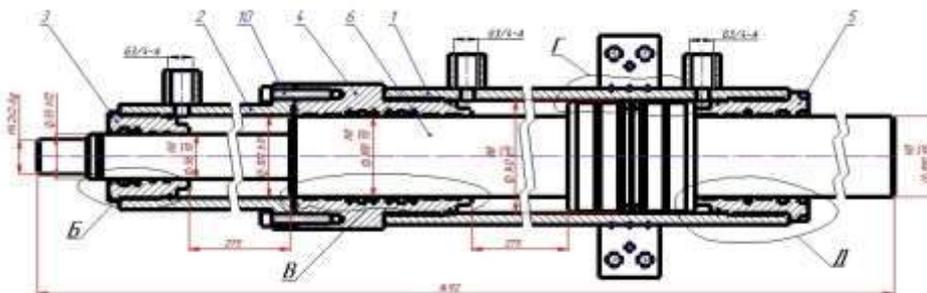


Рисунок 1 – Гідроциліндр піднімання траверси преса

У новій конструкції гідроциліндрів було встановлено додаткову синхронізуючу гільзу 2, який через систему клапанів має зв'язок із робочою порожниною основного гідроциліндра, ця гільза закріплена за допомогою 12 гвинтів М12 до кришки 4. В гідроциліндрі встановлений двохступінчастий шток з монолітним поршнем, який має хід 275 мм, ущільнення для забезпечення коректної роботи штока встановлені в кришках 4,5,3. Для запобігання перекосу штока та надмірного зносу ущільнень гідроциліндра в кришках встановлені направляючі із поліуретану. Для забезпечення точності складальної одиниці, гідроциліндр було спроектовано в системі Solid Works та перевірено на наявність конфліктів деталей в зборці за допомогою команди «перевірити інтерференцію». Всі недоліки складальної одиниці біло усунено після чого був проведений повторний аналіз.

На рисунку 2 зображено результати аналізу даної конструкції.

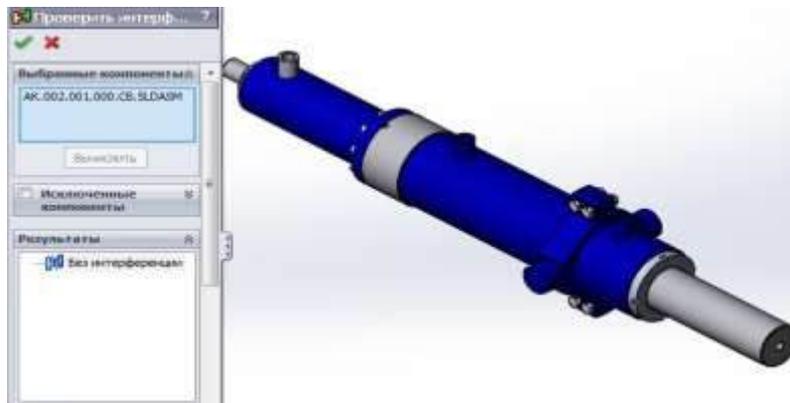


Рисунок 2 – Аналіз конфліктуєчих деталей складальної одиниці

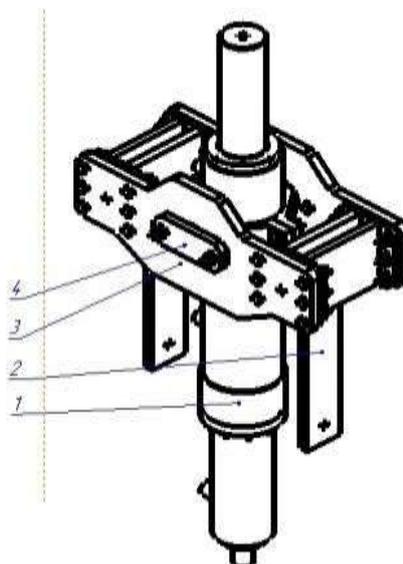


Рисунок 3 – Конструкція кріплення гідроциліндра синхронізації

Після створення нової конструкції гідроциліндрів, з'явилась необхідність в проектуванні нової конструкції кріплення гідроциліндрів. За основу нового кріплення було взято кріплення старого зразка. Нова конструкція кріплення гідроциліндра зображена на рисунку 3.

Кріплення складається із двох кронштейнів 2, несучих балочний пластин 3 та фіксуючих кришок гідроциліндрів 4. Для перевірки стійкості нового кріплення гідроциліндрів було виконано статичний аналіз пласти 3 в SolidWorks Simulation. Модель була навантажена силою яка з'являється під час підйому траверси преса та безпосередньо діє на посадочне місце кріплення гідроциліндра. В результати досліджу зображено на рисунку 4.

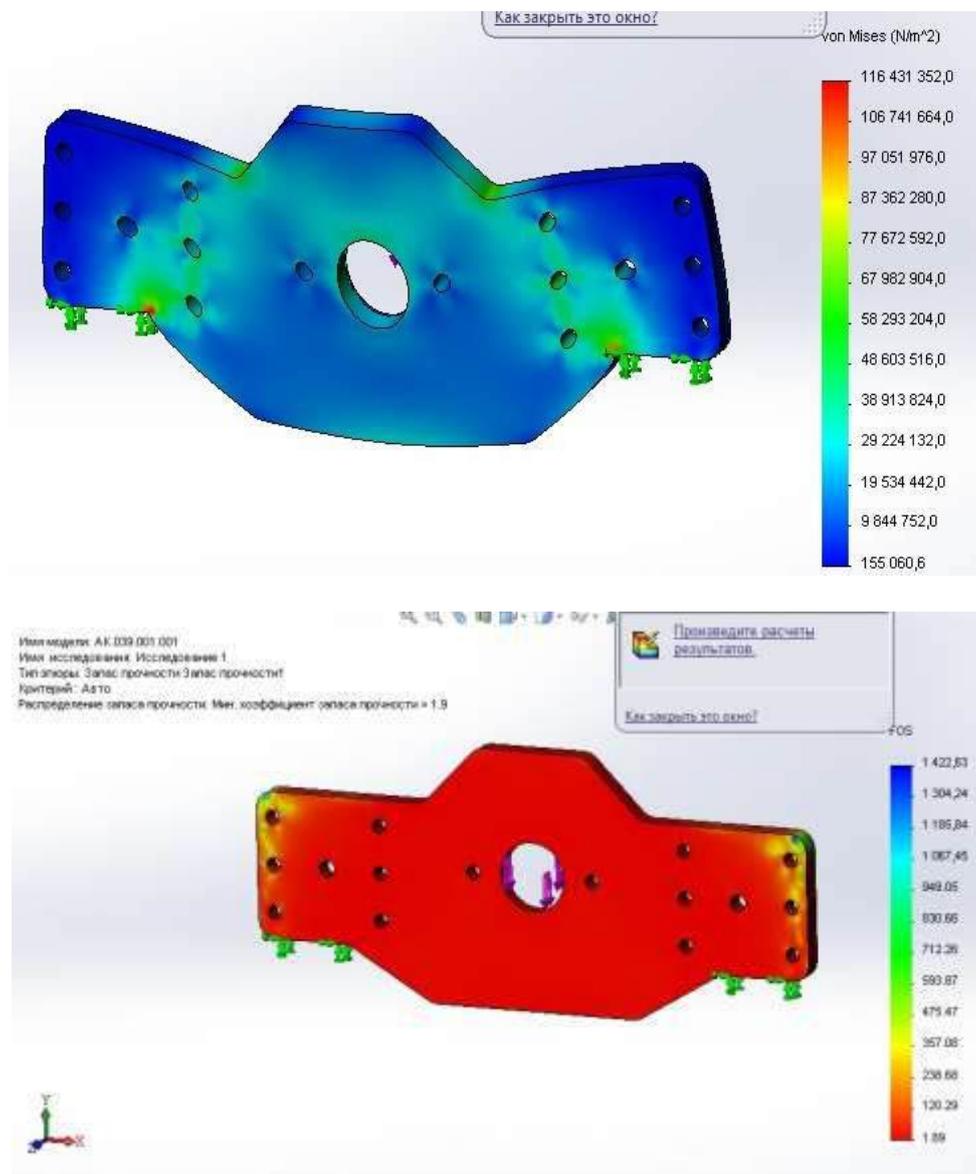


Рисунок 4 – Статичний аналіз деталі

ВИСНОВКИ

Обґрунтовані технічні рішення щодо виготовлення деталі з найбільш доцільним і ефективним використанням технологічного устаткування обумовлені розрахунками та розробкою нових конструкцій гідроциліндрів. Було проведено відповідне аналітичне та розрахункове дослідження з описом розробки конструкції гідроциліндра в SolidWorks Simulation. За результатами аналізу можна зробити висновок, що кріплення гідроциліндрів відповідає експлуатаційним вимогам та має запас міцності 1,9.

Слід відмітити, що підбираючи обладнання і інше технологічне оснащення, необхідно досягати максимального розширення універсальності модернізації вузла та виготовлення деталі.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Hong, S.; Gu, Z.; Chen, L.; Zhu, P.; Lian, H. Synthesis of phenol formaldehyde (PF) resin for fast manufacturing laminated veneer lumber (LVL). *Holzforschung* 2018, 72. Pp. 745-752.
- [2] Ormarsson, S.; Sandberg, D. Numerical simulation of hot-pressed veneer products: Moulding, spring-back and distortion. *Wood Mater. Sci. Eng.* 2007, 2. Pp. 130-137.
- [3] Franke, T.; Herold, N.; Buchelt, B.; Pfriend, A. The potential of phenol-formaldehyde as plasticizing agent for moulding applications of wood veneer: Two-dimensional and three-dimensional moulding. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2018, 76. Pp. 1409-1416.
- [4] *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry* 40:41-51.
- [5] Gupta, A.; Vaishya, R.; Khan, K. L. A.; Walia, R. S.; Singh, H., 2019: Multi-response optimization of hybrid filler composition for pultruded jute fiber reinforced polymer composite. *Materials Research Express*, 6 (11). Pp. 1-14. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4945>
- [6] A. Lobos and J. R. Vera. «Intertemporal stochastic sawmill planning: Modeling and managerial insights» *Comput. Ind. Eng.* 2016, vol. 95. Pp. 53-63.
- [7] C. G. Lundahl. «Optimized processes in sawmills». Licentiate thesis, Dept. Eng. Sci. Math., Luleå Univ. Technol., Division Wood Technol., Skellefteå Campus, Skellefteå, Sweden, 2007.

OPTIMIZATION OF EQUIPMENT DESIGNS FOR VENEER PRODUCTION USING SOLIDWORKS SOFTWARE

¹ *Povstianoi O. DThSc., Professor*

² *Rusakov D. Teacher-Methodologist*

¹ *Lutsk National Technical University / Ukraine*

² *Kovel Industrial and Economic Vocational College / Ukraine*

Abstract. The article shows the introduction of computer technologies for optimizing the designs of equipment for the production of veneer. This will allow

optimizing production work with the benefit of both attracting additional investments and maintaining human environmental well-being. A detailed study of the process of operation of an automatic oak veneer line, identifying the main shortcomings in its operation and methods for their elimination, as well as the main methods of optimizing equipment is relevant in modern production conditions. The paper shows the modernization of the hydraulic cylinder housing. The article shows the development of new or testing existing devices for suitability for use in the technology of manufacturing parts of appropriate complexity using modern SolidWorks software.

Keywords: veneer, optimization, hydraulic cylinder, SolidWorks.

Дата першого надходження
статті до видання
17.03.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування
30.04.2025 р.

Дата
оприлюднення
21.06.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-07>
УДК 621.798:681.5.015.23

¹ Сапон С. П.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0003-1082-6431
² Пономаренко С. В.
Аспірант
ORCID: 0009-0003-3260-6541
³ Яровий Ю. В.
канд., техн., наук, доцент
ORCID: 0000-0002-6997-4108

¹ Національний технічний
університет України «Київський
політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського» / Україна
² Національний університет
«Чернігівська політехніка» /
Україна
³ Одеський національний
морський університет / Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ. ОГЛЯД ПУБЛІКАЦІЙ

Анотація: стаття присвячена огляду сучасних методів прогнозування стабільності процесу різання металів, що є ключовим аспектом для забезпечення якості та ефективності обробки в машинобудуванні. Проведено систематичний аналіз наукових публікацій, присвячених побудові діаграм зон стабільності (Stability Lobe Diagram, SLD), які визначають оптимальні режими різання, що дозволяють уникнути самозбуджуваних вібрацій. У статті розглянуто як теоретичні підходи до побудови SLD, що базуються на математичному моделюванні динаміки процесу різання та розв'язанні диференціальних рівнянь із запізненням, так і експериментальні методи, що використовують дані, отримані безпосередньо під час обробки. Проаналізовано методи частотних інтервалів, дискретні та чисельні методи, а також експериментальні підходи, такі як машинне навчання на основі акустичних сигналів та метод поступового збільшення глибини. Особливу увагу приділено застосуванню SLD для прогнозування стабільності при обробці нежорстких деталей, де динамічна взаємодія інструменту та заготовки є критично важливою. Проведено порівняльний аналіз різних методів побудови SLD, визначено їх переваги та недоліки, а також області застосування. На основі проведеного огляду зроблено висновки про актуальність подальших досліджень у напрямку вдосконалення методів побудови та практичного застосування SLD для оптимізації режимів різання, підвищення продуктивності та якості обробки на металорізальних верстатах різних типів.

Ключові слова: адаптивні системи управління, шпindelний вузол, діаграма зон стабільності, регенеруюча вібрація, машинне навчання, прогнозування вібрацій.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В сучасних умовах виробництва постійно зростають вимоги до якості та точності оброблених поверхонь деталей, особливо у високоточних галузях машино- та приладобудування. Одним з ключових факторів, що впливають на точність обробки, є стабільність процесу різання. Нестабільність може призводити до виникнення самозбуджуючих вібрацій, погіршення якості поверхні та зниження продуктивності. Для забезпечення стабільної роботи та вибору оптимальних режимів різання широко використовуються діаграми зон стабільності (Stability Lobe Diagram, SLD). Ці діаграми відображають залежність максимально допустимої глибини різання від швидкості обертання шпинделя, визначаючи стабільні та нестабільні області обробки.

Значна кількість сучасних досліджень спрямована на розробку та вдосконалення методів прогнозування стабільності різання та побудови SLD діаграм. Ці дослідження включають як теоретичне моделювання динаміки процесу різання, так і експериментальні підходи для визначення меж стабільності. Розуміння та систематизація існуючих методів прогнозування стабільності процесу різання є важливим для подальшого розвитку інтелектуальних систем управління верстатами та оптимізації процесів обробки. Тому існуючі дослідження потребують систематизації та поглибленого вивчення методів та засобів прогнозування стабільності процесу різання шляхом побудови SLD діаграм.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На даний момент існують публікації оглядового характеру, що стосуються інтелектуальних (цифрових) систем управління динамічними характеристиками ШВ [3], [4] [5], [6], [7]. У роботі [7] авторів Quintana та ін. систематизовано методи забезпечення стабільності процесу різання у 2 групи: вибір комбінацій параметрів різання в стабільній зоні SLD та уникання вібрації шляхом зміни поведінки системи та розширення зон стабільності. Але всі приклади в даній роботі обмежені 2011 роком. Yue та ін. проаналізував [3] сучасний стан в передбаченні стабільності фрезерування та методи управління динамічними характеристикам ШВ фрезерних верстатів. Munoa та ін. в своєму огляді [4] не обмежилися фрезеруванням, але більшість проаналізованих методів не можна віднести до категорії інтелектуальних. Liu та інші також проаналізували [5] методи передбачення та управління динамічними характеристиками ШВ при фрезеруванні. Але для передбачення були розглянуті лише математичні моделі та симулювання процесу різання. Натомість експериментальні методи, які враховують безпосередньо всі можливі фактори впливу та процес різання, розглянуті не були. У своєму огляді [6] Sun та ін. систематизував методи забезпечення стабільної обробки тонкостінних деталей та проаналізував в тому числі і інтелектуальні методи. Але весь огляд стосувався лише фрезерної обробки, в той час, як проблема обробки деталей з малою жорсткістю актуальна і для інших типів верстатів.

Для створення даної статті була застосована методологія систематичного літературного огляду [8], яка оснований на виборі стратегії пошуку, фільтруванні, аналізі та систематизації знайдених публікацій.

Був використаний пошук за ключовими словами для попереднього відбору потенційно актуальних наукових публікацій не старіше 2015 року. Пошук публікацій виконувався по наступним науковим базам: Google Scholar, MDPI, Scopus та Science Direct. Статті відбиралися по ключовим словам інтелектуальний/розумний шпindel та управління вібраціями. Найбільш відповідні пошуковому запиту роботи відбиралися по назві та анотації. Результати аналізу за ключовими словами представлені на рисунках 1-3. Як видно з графіка на рисунку 2, кількість досліджень шпинделів з інтелектуальними функціями має стале зростання, що беззаперечно свідчить про актуальність цієї тематики. Найбільше досліджень на цю тему виявлено в Китаї (рис. 3).

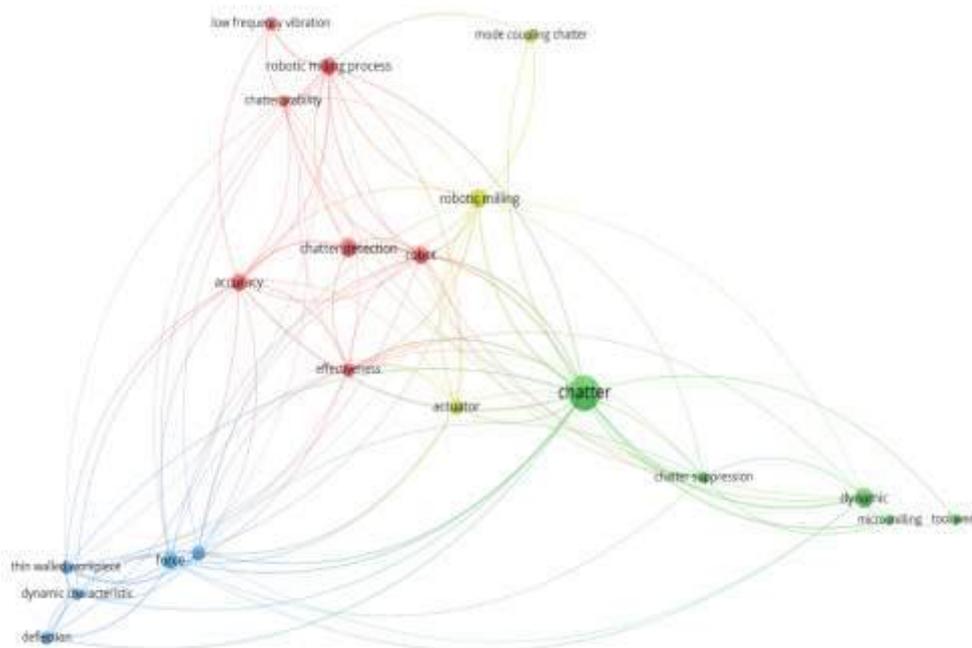


Рисунок 1 – Результати аналізу пошуку статей за ключовими словами Stability Lobe Diagram та регенеруюча вібрація

Для даного огляду були обрані статті, що стосуються побудови Stability Lobe Diagram (SLD) діаграм для визначення зон стабільного різання. Знайдені за пошуковим запитом статті розподілені по досліджуваним в них методам побудови SLD. Показані способи побудови діаграм стабільності та дана узагальнююча оцінка.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

При аналізі знайдених публікацій по побудові діаграм стабільності всі методи були розділені на теоретичні та експериментальні. В даній статті розглянуто підходи до побудови SLD. Необхідно дати оцінку приведених

досліджень та визначити подальші перспективи та проблемні моменти в розвитку способів побудови діаграм стабільності.

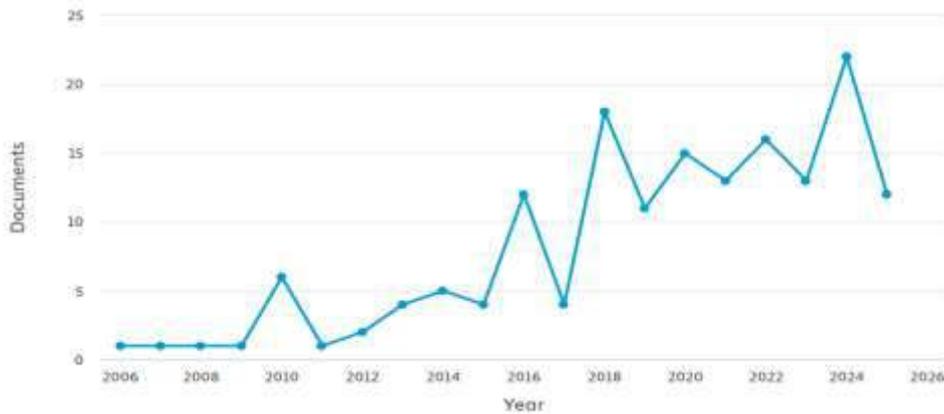


Рисунок 2 – Кількість публікацій за запитом Stability Lobe Diagram та регенеруюча вібрація по роках

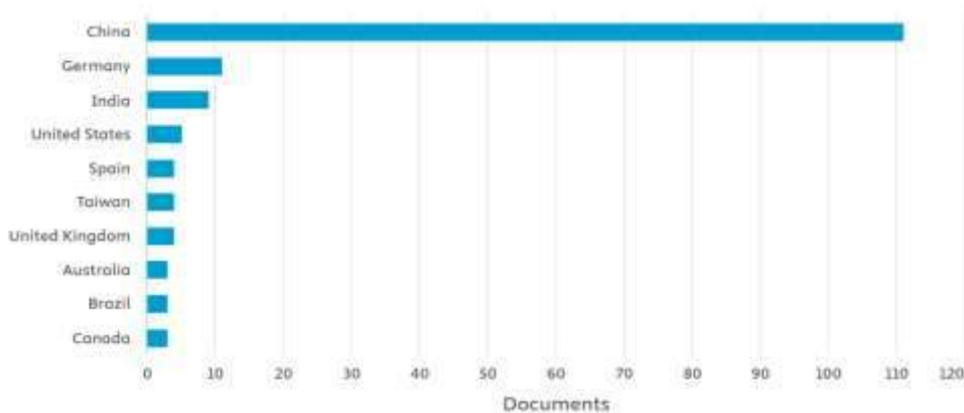


Рисунок 3 – Кількість публікацій по країнах за запитом Stability Lobe Diagram та регенеруюча вібрація

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1 Прогнозування стабільності процесу різання

Динамічні характеристики ШВ визначають стабільність процесу різання при різних режимах роботи. Побудова діаграми стабільності SLD, яка визначає максимальну глибину різання при визначеній швидкості обертання, якнайкраще підходить для опису стабільності процесу різання. Перевищення максимальної глибини різання призводить до появи самозбурюючих вібрацій, тобто до виходу системи із стабільного стану.

Через недостатню динамічну жорсткість одного або декількох елементів технологічної обробляючої системи в процесі різання виникають три типи механічних вібрацій [1]: вільні вібрації, вимушені вібрації та самозбуджуючі

вібрації. Вільні вібрації спричинені ударом, вимушені вібрації спричинені розбалансуванням у шпинделях. Після виявлення причин цих двох типів вібрацій відносно просто уникнути, зменшити або усунути їх. Самозбуджуюча вібрація – це незатухаюча вібрація, що викликана змінною силою, яка виникає внаслідок взаємодії між інструментом і заготовкою. Цей тип вібрації збільшує нестабільність та неконтрольованість системи. В залежності від специфіки механізму самозбудження вібрації можна розділити на три групи [1]: фрикційна вібрація, вібрація внаслідок накладання власних частот (mode coupling chatter) та регенеруюча вібрація. Вібрації перших двох груп можна подолати за рахунок використання експериментального моделювання та аналізу. Регенеруюча вібрація спричинена різницею товщини стружки, що виникає внаслідок різниці фаз між формою поверхні після попереднього проходу інструменту та її зміщенням на наступному проході (рис. 4). Взаємодія ріжучої кромки з хвилястою поверхнею від попереднього проходу може значно збільшити вібрації, що призведе до експоненціального збільшення товщини стружки, таким чином ведучи до значно більших сил і вібрацій, доки ріжучий інструмент не вийде з контакту із заготовкою.

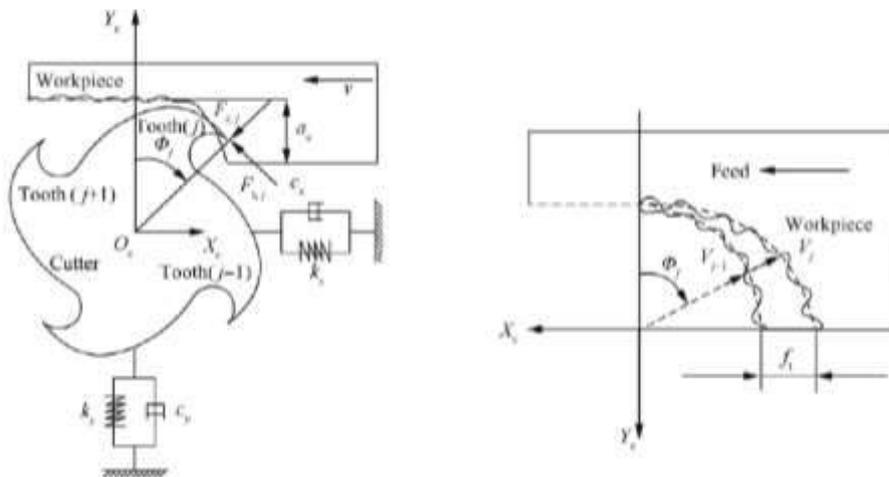


Рисунок 4 – Динамічна модель процесу фрезерування [3]

На даний момент найбільш популярним методом передбачення вібрації є побудова діаграм зон стабільності (SLD) шляхом розв'язання диференціальних рівнянь запізнення по часу процесу різання [3]. Оператор може обрати прийнятні глибину різання та швидкість обертання шпинделя в SLD щоб збільшити стабільність процесу різання.

2 Теоретичні методи побудови SLD

Регенеруюча вібрація зазвичай не виникає на низьких обертах шпинделя через демпфування, але при збільшенні швидкості обертання ефект демпфування знижується [1]. Таким чином оптимізація швидкості зняття матеріалу викликає необхідність вивчення SLD. Для побудови SLD використовується математична модель з чотирма вхідними показниками: коефіцієнти різання, динамічні параметри системи, параметри процесу

різання та геометрія інструменту. Процес різання може бути оптимізований, як зображено на рисунку 5, де M , C , K , $K_c(t)$, $\dot{q}(t)$, $q(t)$, $[q(t) - q(t-T)]$ є відповідно маса, демпфування, жорсткість, коефіцієнт сили різання, прискорення, швидкість, зміщення, динамічне зміщення ріжучої системи; a_p , Z , D – глибина різання, кількість зубів інструменту та діаметр інструменту; a_{cr} , b , p – гранична глибина різання, радіальна ширина різання та швидкість обертання шпинделя.

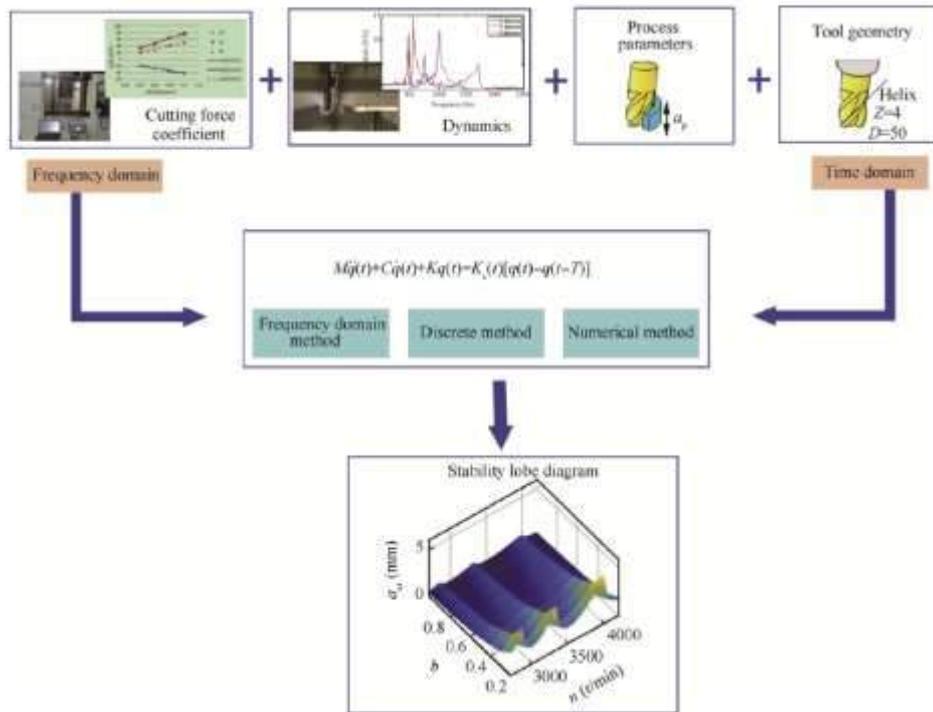


Рисунок 5 – Процес побудови SLD [1]

Коефіцієнти різання представляють межу текучості матеріалу, тертя між інструментом та заготовкою та геометрію інструмента. Для визначення коефіцієнтів різання існують два підходи: приведення коефіцієнтів ортогонального різання до геометрії заданого інструмента [7] та проведення тестової обробки заданим інструментом з вимірюванням сили різання [8].

Динамічні параметри оброблюючої системи визначаються експериментально способом ударних тестів або іншими доступними експериментами [2]. Метою цих експериментів є знаходження відносних вібрацій в зоні контакту інструменту із заготовкою, які спричинені власними критичними частотами оброблюючої системи, що обмежують продуктивність. У залежності від характеристик процесу різання динамічні параметри можуть змінюватися, тому може знадобитися визначення декількох амплітудно-частотних характеристик в зоні контакту інструменту із заготовкою. У випадку обробки нежорстких заготовок динамічні характеристики також можуть

змінюватися при знятті матеріалу. Цей ефект ускладнює визначення динамічних параметрів [9]. Тому при побудові SLD для процесу обробки тонкостінних або нежорстких заготовок необхідно враховувати податливість заготовки під дією сил різання. Це питання було розглянуто в роботах Данильченка та ін. [10] і Sun та ін. [11]. Вплив жорсткості заготовки на стабільність різання при точінні розглянутий в роботі Gábor та ін. [12]. На рисунку 6 показані межі стабільного різання при товщині стружки 1,75 мм для діаметру заготовки 16мм (а) та залежність стабільності різання від діаметру заготовки (б). Також методика визначення оптимальних режимів різання при обробці тонких лопатей була запропонована Petráček та ін. [13]. Її суть полягала у розбитті по висоті оброблюваної поверхні на ділянки та розрахунку інтервалів швидкості обертання при стабільному різанні для визначених ділянок. Таким чином були визначені швидкості обертання для кожної ділянки, що було занесено в програму обробки. Для врахування жорсткості заготовки дуже зручно користуватися 3D-SLD графіками, хоча побудова таких графіків, зображених на рисунку 7 є достатньо трудомісткою.

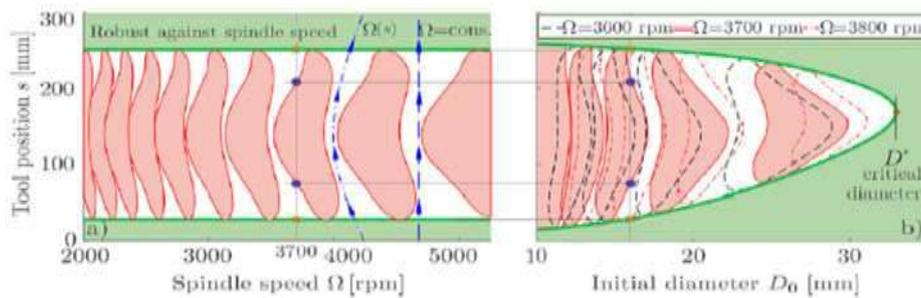


Рисунок 6 – Межі стабільності при точінні нежорсткої заготовки [14]

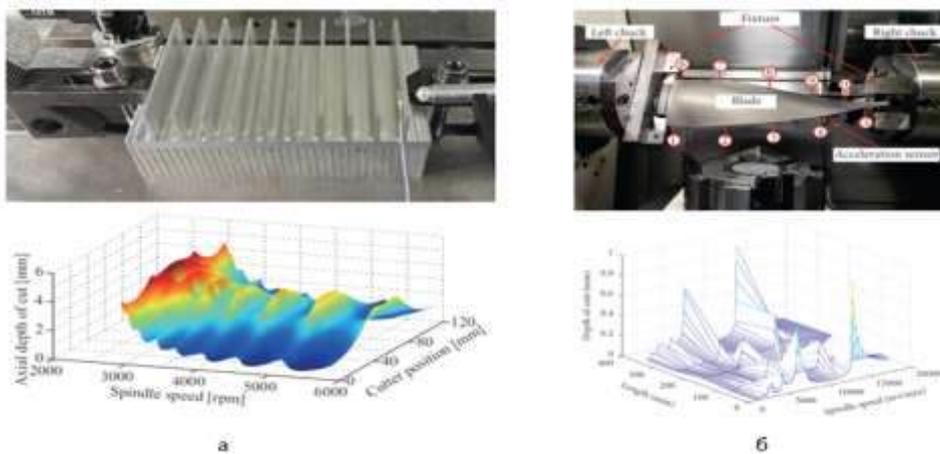


Рисунок 7 – Приклади 3D-діаграм стабільності при обробці тонкостінної заготовки (а) [14]; при обробці лопаті (б) [15]

Параметри процесу різання, такі як врізання інструменту в заготовку, необхідні для моделі стабільності. При складній обробці врізання може постійно змінюватися, тому розрахунки стабільності вимагають тісного зв'язку з САМ системою для створення віртуального середовища обробки, де різні врізання для різних інструментів, операцій та траєкторій можуть бути перенесені в модель стабільності [2]. У деяких випадках інші параметри різання, наприклад, напрям різання, величина подачі також необхідно враховувати для прогнозування стабільності [16]. Це особливо важливо для зубчастих ріжучих кромки або коли розглядаються моделі нелінійних сил [17].

Математична модель стабільності враховує також геометрію інструмента, що впливає на коефіцієнт сили різання, кінематику різання і коефіцієнти напрямку динамічної сили. Такі процеси металообробки як точіння, фрезерування та свердління виконуються інструментами з широким варіюванням допустимої геометрії. Була запропонована уніфікована методологія [18], що базується на основі дискретизації інструменту в нескінченно малих перерізах та застосування перетворення ортогональних параметрів в кутові на кожному перерізі. Такі методи дозволяють будувати SLD для складних інструментів.

Математично динаміка різання для регенеративних ефектів задається диференціальним рівнянням затримки (DDE) з постійними параметрами (точіння) або періодичними в часі параметрами (фрезерування) [1]. Таким чином, метод затримки часу може бути використаний для вирішення DDE та отримання межі стабільності для різання. За цим методом визначаються критичні параметри обробки, щоб область різання можна було розділити на стабільну та нестабільну зони. Потім в стабільній зоні обираються найбільш придатні параметри різання. Таким чином можна уникнути вібрації, посприяти підвищенню ефективності обробки та досягти кращої якості обробки. Методи частотних інтервалів, дискретні методи та чисельні методи є загальними підходами для побудови SLD.

Методи частотних інтервалів зазвичай використовуються для вираження DDE вібраційних моделей в частотній зоні через перетворення Фур'є. І межа стабільності фрезерування визначається теоретично. Метод частотної області нульового порядку ZOA був запропонований Алтінтасом і Будаком [19]. Цей метод є найбільш розповсюдженим для пошуку межі вібраційної стабільності. Однак цей метод не в змозі передбачити додаткову стабільну область при малому радіальному врізанні. Оскільки співвідношення ширини різання/діаметра інструменту зменшується, вникає значне відхилення в прогнозі локальної стабільності [20]. Для вирішення даної проблеми був запропонований [21] та удосконалений [22] багаточастотний метод, який враховує вищі гармоніки динамічної системи.

Моделі регенеративної вібрації, як правило, є системою DDE. Стабільність визначається власним вектором однозначного системного оператора, але однозначний оператор представлений матрицею нескінченної розмірності, що ускладнює розв'язання результатів прогнозування стійкості в закритій формі [1]. У дискретних методах зазвичай використовується скінченновимірна матриця перетворення для апроксимації однозначного оператора

нескінченної розмірності, таким чином зменшуючи складність розв'язання та час обчислення. Основними видами дискретних методів є: напівдискретний метод [23], [24], повністю дискретний метод [25], [26] і метод часових скінчених елементів [27], [28].

Чисельні методи зазвичай напряму розв'язують диференціальне рівняння затримки та отримують динамічний відгук для процесу фрезерування [1]. Після цього стабільність процесу фрезерування можна оцінити за допомогою критеріїв стабільності, побудованих відповідно до відгуку або того, чи є амплітуда вібрації відгуку розбіжною. Qu та ін. [29] використовували статистичну дисперсію динамічного зміщення як критерій виявлення вібрації для отримання SLD процесу різання. Zhang та ін. [30] запропонували чисельний диференціальний метод, заснований на методах кінцевої різниці і екстраполяції, щоб визначити стабільність високошвидкісного фрезерування. Чисельний метод екстраполяції можна неодноразово використовувати для отримання прогнозів стабільності з різним порядком точності.

У роботі [31] було запропоновано моделювання процесу різання в частотній та часовій області за критерієм сталості, що ґрунтується на аналізі частотних характеристик у вигляді діаграми Найквіста, по якому побудовано діаграму стабільності процесу різання. Алгоритм побудови SLD показано на рисунку 8.

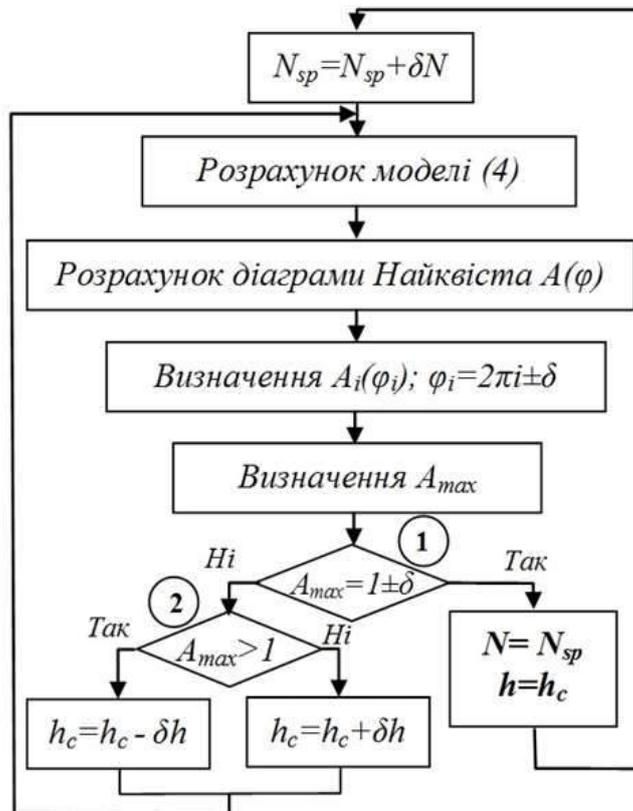


Рисунок 8 – Алгоритм розрахунку діаграми сталості [31]

Також були проведені експериментальні дослідження, які підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та алгоритму (рис. 9 **Помилка! Джерело посилання не знайдено.**). Даний підхід вибору режимів є досить перспективним для використання в інтелектуальній системі управління шпинделем, адже характеристики роботи шпинделя змінюються в часі, а маючи надійний критерій стабільності можна вчасно регулювати динаміку ШВ для забезпечення стабільності різання без зниження продуктивності.



Рисунок 9 – Поверхні деталі, оброблені при: а – розрахованому несталому режимі; б – розрахованому сталому режимі [31]

3 Експериментальні методи побудови SLD

Окрім теоретичних методів побудови SLD діаграм були запропоновані методи побудови, основані на експериментальних даних. У роботі [32] запропоновано визначати режими різання для стабільного фрезерування по методу машинного навчання по фізичній моделі. Навчання проходило на основі отриманих акустичних сигналів. Машинне навчання було спрямоване на визначення оптимальної швидкості обертання шпинделя, яка б забезпечувала стабільність роботи при максимальній глибині різання. На основі експериментів з обробки алюмінію була побудована діаграма стабільної роботи в залежності від глибини різання та частоти обертання шпинделя (рис. 10). Виявлено, що рекомендовані виробником режими різання знаходяться за межами стабільної роботи кінцевої фрези.

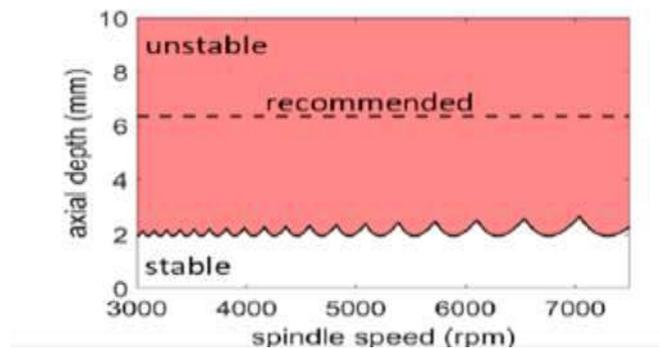


Рисунок 10 – Розрахована за допомогою машинного навчання та рекомендована виробником глибина різання для роботи в стабільному режимі [32]

Brecher та ін. у роботі [33] запропонував швидкий метод експериментального визначення межі стабільного різання. Суть методу полягала у визначенні початку вібрації акселерометром при фрезеруванні пазу з постійним збільшенням глибини різання при різних частотах обертання шпинделя. Такий підхід дозволив зменшити кількість дослідів, а також врахувати всі стохастичні збурення системи, які не можливо повністю описати в математичній моделі.

Для більш точної побудови SLD діаграм Akbari та ін. запропонував [34] визначати динамічні характеристики оброблюючої системи безпосередньо під час обробки. Запропонований спосіб базувався на контактному зв'язку підконструкцій або RCSA, що дозволило виділити підконструкції верстат–шпиндель і тримач–інструмент у пов'язану систему обробки. Таким чином динамічні характеристики процесу різання можна визначити за допомогою датчика, виведеного із зони різання. Отримані сигнали обробляються з урахуванням матриць переходу між визначеними підконструкціями. Методи побудови SLD діаграм зведені до таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація методів побудови SLD

Метод	Спосіб визначення стабільності	Посилання
Теоретичні методи		
Методи частотних інтервалів	Метод частотної області нульового порядку Багаточастотний метод	[19] [20] [21] [22]
Дискретні методи	Напівдискретний метод Повністю дискретний метод Метод часових скінчених елементів	[23] [24] [25] [26] [27],[28]
Чисельні методи	Статистична дисперсія динамічного зміщення Чисельний метод екстраполяції	[29] [30]
Експериментальні методи		
Метод машинного навчання по фізичній моделі	Акустичні сигнали	[32]
Метод поступового збільшення глибини різання	Акселерометр	[33]
Метод контактного зв'язку підконструкцій або RCSA	Датчик зміщень та акселерометр	[34]

Обрані для даної статті дослідження були зведені в таблицю 2. Серед запропонованих способів побудови SLD був визначений спосіб експериментальної валідації, а також умови проведення експерименту.

ВИСНОВКИ

Більшість методів побудови SLD та експериментальних досліджень виконано на оброблюючих центрах, при цьому досліджується в основному процес фрезерування, що пояснюється його широкою універсальністю з точки

1 Таблиця 2 – Експериментальне дослідження методів підвищення стабільності

№ з/п	Методи підвищення стабільності	Спосіб побудови SLD	Дані експерименту					Посилання
			Заготовка	Режим різання	Верстат	Інструмент	Датчики визначення вібрації	
1	Машинне навчання по фізичній моделі (PGML)	Monte Carlo	6061-T6	6264-24828 хв ⁻¹ t=2,3-5мм, 0,102мм/зуб	Haas VF-4 three-axis milling machine	Ø12,7мм, 3 зуба	Shure SM94 мікрофон	[32]
2	По даним експерименту	Poincaré-section based time domain method	Сталь С45	0,01 мм/зуб; (2-4)·10 ³ хв ⁻¹	Двохшпindelний оброблюючий центр	Ø16мм, 4 зуба	Акселерометр	[33]
3	По даним експерименту	ZOA	Алюміній 6082	0,1мм/зуб t=0,4мм (8-20)·10 ³ хв ⁻¹	GF Mikron HPM 800U 5-axis milling machine	Ø12мм, 4 зуба	NCDT 3010-U05-M-C3 безконтактний емнісний сенсор	[34]
4	По даним експерименту	ZOA	Сталь Fe37B1FN	600 хв ⁻¹ ; 34 мм/хв; t = 0.1-0.3мм	Експериментальний стенд	Ø16мм, 2 зуба	Акселерометр PCB 353B15	[10]
5	По даним експерименту	Напівдискретний метод	Алюміній 6061-T6	t _r =0.2мм; 4000-7000хв ⁻¹	5-координатний оброблюючий центр	Ø16мм, 1 зуб	Мікрофон GRAS 46AE Динамометр KISTLER 9257B	[11]
6	По даним експерименту	Метод скінчених елементів	34CrNiMo6 Ø42мм	3500 хв ⁻¹ t= 0.2мм	Doosan Puma 2500Y CNC	Sandvic SNMM 12 04 12-PR 4215 вставка	PCB Piezotronic 353B03; Мікрофон Shure Prologue 14 L	[12]
7	По даним експерименту	Метод скінчених елементів	Алюміній 7075	(12-13)·10 ³ хв ⁻¹ t=0.15-0.9мм; 2032 мм/хв	MCU700 5AX five-axis milling machine	Ø10мм ISCAR MM EB100A07-4T06	Keyence VHX-7000 with Dual Objective Zoom Lens VH-ZST	[13]
8	По даним експерименту для тонкостінних деталей	Метод скінчених елементів	Алюміній 7050	t _r =5% 0.05 мм/зуб 3200-5500хв ⁻¹	Експериментальний стенд	Ø12мм, 4 зуба	Динамометр KISTLERTM 9255B; датчик переміщень Мікрофон	[14]
9	По даним експерименту	Напів-дискретний метод	Титановий слав	t _r =0,2 мм, 500 мм/хв; t=0,03-0,6мм; 2500-6000хв ⁻¹	Mazak 200 IV ST токарний оброблюючий центр	Ø10мм, 2 зуба	Акселерометр PCB 356A32	[15]

зору обробки поверхонь різноманітної геометрії. Втім, автори вважають доцільним розширення діапазону дослідження способів побудови діаграм стабільності на верстати інших груп. Це може дати можливість відчутно посприяти підвищенню ефективності виробничого підприємства в цілому при відносно незначних витратах. Попри достатньо велику теоретичну базу актуальним залишається питання практичної перевірки адекватності новітніх методів побудови та застосування діаграм стабільності. Наряду з цим існують досі недостатньо вивчені технологічні процеси, наприклад, обробка нежорстких деталей, коли обов'язково необхідно враховувати вплив динамічної взаємодії інструменту та заготовки на стабільність процесу різання.

Тому подальші дослідження цікавими та найбільш актуальними будуть у напрямку вдосконалення методів побудови та практичного застосування SLD для оптимізації режимів різання, підвищення продуктивності та якості обробки на металорізальних верстатах не фрезерувальної групи.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] C. YUE, H. GAO, X. LIU, S. Y. LIANG, and L. WANG, "A review of chatter vibration research in milling," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 32, no. 2, pp. 215–242, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.cja.2018.11.007.
- [2] J. Munoa et al., "Chatter suppression techniques in metal cutting," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 65, no. 2, pp. 785–808, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.004.
- [3] B. Liu, C. Liu, X. Yu, Y. Zhou, and D. Wang, "Prediction, detection, and suppression of regenerative chatter in milling," Oct. 01, 2022, SAGE Publications Inc. doi: 10.1177/16878132221129746.
- [4] Y. Sun, M. Zheng, S. Jiang, D. Zhan, and R. Wang, "A State-of-the-Art Review on Chatter Stability in Machining Thin-Walled Parts," Mar. 01, 2023, MDPI. doi: 10.3390/machines11030359.
- [5] G. Quintana and J. Ciurana, "Chatter in machining processes: A review," May 2011. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001.
- [6] H. Snyder, "Literature review as a research methodology: An overview and guidelines," *J Bus Res*, vol. 104, pp. 333–339, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JBUSRES.2019.07.039.
- [7] Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. doi: DOI: 10.1017/CBO9780511843723.
- [8] Z. Q. Yao, X. G. Liang, L. Luo, and J. Hu, "A chatter free calibration method for determining cutter runout and cutting force coefficients in ball-end milling," *J Mater Process Technol*, vol. 213, no. 9, pp. 1575–1587, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2013.03.023.
- [9] E. Budak, L. T. Tunç, S. Alan, and H. N. Özgüven, "Prediction of workpiece dynamics and its effects on chatter stability in milling," *CIRP Annals*, vol. 61, no. 1, pp. 339–342, Jan. 2012, doi: 10.1016/J.CIRP.2012.03.144.
- [10] Y. Danylchenko et al., "Dynamic characteristics of 'tool-workpiece' elastic system in the low stiffness parts milling process," in *Mechatronic Systems 2*, Routledge, 2021, pp. 225–236. doi: 10.1201/9781003225447-20.

[11] Y. Sun and S. Jiang, "Predictive modeling of chatter stability considering force-induced deformation effect in milling thin-walled parts," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 135, pp. 38–52, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2018.08.003.

[12] G. Stepan, A. K. Kiss, B. Ghalamchi, J. Sopanen, and D. Bachrathy, "Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces," *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 66, no. 1, pp. 377–380, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.054.

[13] P. Petráček, J. Falta, M. Stejskal, A. Šimůnek, P. Kupka, and M. Sulitka, "Chatter-free milling strategy of a slender Blisk blade via stock distribution optimization and continuous spindle speed change," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 124, no. 3–4, pp. 1273–1295, Jan. 2023, doi: 10.1007/s00170-022-10264-6.

[14] J. Feng, M. Wan, T.-Q. Gao, and W.-H. Zhang, "Mechanism of process damping in milling of thin-walled workpiece," 2018.

[15] Z. Zhao, J. Hou, and Y. Fu, "Measurement-Based Modal Analysis and Stability Prediction on Turn-Milling of Hollow Turbine Blade," *Shock and Vibration*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/8861373.

[16] Z. Dombovari, Y. Altintas, and G. Stepan, "The effect of serration on mechanics and stability of milling cutters," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 50, no. 6, pp. 511–520, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.IJMACHTOOLS.2010.03.006.

[17] R. G. Landers and A. G. Ulsoy, "Nonlinear Feed Effect in Machining Chatter Analysis," *J Manuf Sci Eng*, vol. 130, no. 1, Feb. 2008, doi: 10.1115/1.2783276.

[18] Y. Altintas and Z. M. Kilic, "Generalized dynamic model of metal cutting operations," *CIRP Annals*, vol. 62, no. 1, pp. 47–50, Jan. 2013, doi: 10.1016/J.CIRP.2013.03.034.

[19] Y. Altıntaş and E. Budak, "Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling," *CIRP Annals*, vol. 44, no. 1, pp. 357–362, Jan. 1995, doi: 10.1016/S0007-8506(07)62342-7.

[20] J. Gradišek et al., "On stability prediction for low radial immersion milling," *Machine Science and Technology*, vol. 9, pp. 117–130, Mar. 2005, doi: 10.1081/MST-200051378.

[21] S. D. Merdol and Y. Altintas, "Multi Frequency Solution of Chatter Stability for Low Immersion Milling," *J Manuf Sci Eng*, vol. 126, no. 3, pp. 459–466, Sep. 2004, doi: 10.1115/1.1765139.

[22] M. Pour and M. A. Torabizadeh, "Improved prediction of stability lobes in milling process using time series analysis," *J Intell Manuf*, vol. 27, Apr. 2014, doi: 10.1007/s10845-014-0904-9.

[23] X. Dong, W. Zhang, and S. Deng, "The reconstruction of a semi-discretization method for milling stability prediction based on Shannon standard orthogonal basis," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 85, no. 5, pp. 1501–1511, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7719-5.

[24] W. Zhang, Y.-C. Ma, W.-H. Zhang, and Y. Yang, "Study on the construction mechanism of stability lobes in milling process with multiple modes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79, Jul. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6829-4.

[25] X. Tang, F. Peng, R. Yan, Y. Gong, Y. Li, and L. Jiang, "Accurate and efficient prediction of milling stability with updated full-discretization method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, no. 9, pp. 2357–2368, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8923-7.

[26] Z. Li, Z. Yang, Y. Peng, F. Zhu, and X. Ming, "Prediction of chatter stability for milling process using Runge-Kutta-based complete discretization method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 1, pp. 943–952, 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8207-7.

[27] B. Mann and B. Patel, "Stability of Delay Equations Written as State Space Models," *Journal of Vibration and Control - J VIB CONTROL*, vol. 16, pp. 1067–1085, Jul. 2010, doi: 10.1177/1077546309341111.

[28] N. K. Garg, B. P. Mann, N. H. Kim, and M. H. Kurdi, "Stability of a Time-Delayed System With Parametric Excitation," *J Dyn Syst Meas Control*, vol. 129, no. 2, pp. 125–135, May 2006, doi: 10.1115/1.2432357.

[29] S. Qu, J. Zhao, and T. Wang, "Three-dimensional stability prediction and chatter analysis in milling of thin-walled plate," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 5, pp. 2291–2300, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8357-2.

[30] X. Zhang, C. Xiong, Y. Ding, and H. Ding, "Prediction of chatter stability in high speed milling using the numerical differentiation method," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, no. 9, pp. 2535–2544, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8708-z.

[31] Y. Petrakov and M. Danylchenko, "A time-frequency approach to ensuring stability of machining by turning," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, pp. 85–92, Dec. 2022, doi: 10.15587/1729-4061.2022.268637.

[32] G. Corson, J. Karandikar, and T. Schmitz, "INTEGRAL BLADE ROTOR MILLING IMPROVEMENT BY PHYSICS-GUIDED MACHINE LEARNING," United States, 2021. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/1836426>

[33] C. Brecher, P. Chavan, and A. Eppele, "Investigations on the limitations of rapid experimental determination of stability boundaries during milling," *Mechanics & Industry*, vol. 18, p. 608, Jan. 2017, doi: 10.1051/meca/2017037.

[34] V. Ostad Ali Akbari, Y. Mohammadi, M. Kuffa, and K. Wegener, "Identification of in-process machine tool dynamics using forced vibrations in milling process," *Int J Mech Sci*, vol. 239, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107887.

PREDICTION OF CUTTING PROCESS STABILITY: A REVIEW OF PUBLICATIONS

¹ **Sapon S.** *PhD, Associate Professor*

² **Ponomarenko S.** *PhD student*

³ **Yarovyi Y.** *PhD, Associate Professor*

¹ **Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute / Ukraine**

² *Chernihiv Polytechnic National University / Ukraine*

³ *Odesa National Maritime University / Ukraine*

Abstract. This article reviews modern methods for predicting the stability of metal cutting processes, a crucial aspect for ensuring the quality and efficiency of machining in mechanical engineering. The authors conduct a systematic analysis of scientific publications dedicated to the construction of Stability Lobe Diagrams (SLD), which define optimal cutting regimes to avoid chatter. The paper considers both theoretical approaches to SLD construction, based on the mathematical modeling of cutting dynamics and the solution of delay differential equations, and experimental methods that utilize data obtained directly during machining. Frequency domain methods, discrete methods, and numerical methods are analyzed, along with experimental approaches such as machine learning based on acoustic signals and the step-by-step increase of cutting depth method. Particular attention is paid to the application of SLD for predicting stability when machining flexible workpieces, where the dynamic interaction between the tool and the workpiece is critically important. A comparative analysis of different SLD construction methods is carried out, identifying their advantages and disadvantages, as well as their areas of application. Based on the review, conclusions are drawn about the relevance of further research in the direction of improving the methods of constructing and practically applying SLDs for optimizing cutting regimes, increasing productivity, and enhancing the quality of machining on various types of machine tools.

Keywords: intelligent control systems, spindle unit, stability lobe diagram, chatter, machine learning, vibration prediction.

Дата першого надходження
статті до видання
22.01.2025 р.

Дата прийняття статті до друку
статті після рецензування
18.04.2025 р.

Дата
оприлюднення
21.06.2025 р.

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-01-08>
УДК 338.48

Худавердієва В. А.
канд., екон., наук, доцент
ORCID 0000-0002-0100-5079

Державний біотехнологічний
університет / Україна

ВПЛИВ ТЕНДЕНЦІЙ ЦИФРОВІЗАЦІЇ НА ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НОВОВВЕДЕНЬ В ГАЛУЗІ ТУРИЗМУ

Анотація: актуальність теми обумовлена появою нового типу так званих «цифрових туристів» і вимагає модернізації інформаційного середовища туризму, яке стає найважливішою складовою сучасного туризму. При цьому рівень розвитку інформаційно-комунікаційних технологій безпосередньо впливає на всі аспекти організації туристського бізнесу. Цифровізація призводить до появи віртуальних подорожей, онлайн туркомпаній, просторово-розподілених мережевих туроператорських структур та ін. Технології цифрової економіки дають можливість забезпечити максимально персоналізовану взаємодію, яка надає перевагу більшості сучасних мандрівників.

У статті подано аналіз впливу четвертої промислової революції на туристичну сферу світової економіки. Розглянуто тенденції інноваційних технологічних змін. Наведено приклади реалізації технологічних та соціальних мегатрендів у світовій туріндустрії. Проведено оцінку їх відповідності технологічним пакетам 4.0 та мегатрендам майбутнього туризму. Сформульовано відмінні ознаки розумного виробництва та інноваційних smart-турпродуктів, позначено їх економічні та соціальні ефективності, перспективи створення туристичної технологічної платформи.

За результатами проведеного дослідження визначено передумови до інноваційного відтворення турпродуктів за умов Індустрії 4.0, основні технологічні напрями в тенденціях світового туризму, сформовані технологічні параметри інноваційних smart регіональних турпродуктів. Блокчейн надає можливості для значного підвищення якості та прозорості логістики та закупівельної діяльності. Використання біометричних даних розширює можливості оплати та використання послуг, які потребують ідентифікації відвідувача. «Інтернет речей» та розумні міста змінюють загальне середовище ведення бізнесу. Соціальні роботи та інші кіберфізичні системи дозволяють автоматизувати базові робочі процеси готелів та ресторанів. При відносній простоті базового змісту готельних і ресторанних послуг, індустрія гостинності, як і багато інших галузей, перебуває під впливом низки технологічних тенденцій. Підсумовуючи роль вже використовуємих і перспективних цифрових технологій, їх можна охарактеризувати як якісний перехід від цифровізації окремих бізнес-завдань і процесів до цифрової трансформації всього бізнесу.

Ключові слова: індустриальна революція 4.0, туристична сфера економіки, цифрові технології, цифровізація, інформаційні технології, HORECA, туристична технологічна платформа.

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Технологічні інновації залишаються одним з головних драйверів економічного зростання та розвитку більшості галузей сучасної економіки. Це стосується зокрема сектору послуг і зокрема сегменту HORECA (індустрії гостинності). Реалізація парадигми цифрової економіки передбачає глибоку перебудову бізнес-моделей та бізнес-процесів компаній. Однак на сьогоднішній день в індустрії гостинності, впровадження цифрових та інтегрованих технологій носить досить поверхневий характер, часто обмежуючись автоматизацією низки базових функцій (електронна обробка замовлень, касове обслуговування, онлайн-бронювання), надання телекомунікаційних послуг споживачам та використанням соціальних медіа у просуванні турпродукту і турпослуги [1].

У сьогоднішньому цифровому середовищі, яке має тенденцію до досить швидкого розвитку, трансформація більше не розкіш, а необхідність для бізнесу, щоб залишатися конкурентоспроможним і актуальним. Організації, які не можуть адаптуватись, ризикують залишитися позаду. Термін «цифрова трансформація» відноситься до інтеграції цифрових технологій в організації з метою підвищення продуктивності, ефективності та стійкості. Цей термін привернув увагу під час пандемії коронавірусу (COVID-19) і став означати широке культурне зрушення у бік більш гнучких і розумних способів ведення бізнесу. Штучний інтелект (ШІ), великі дані та хмара вважаються основними перетворюючими технологіями, що мають широке застосування у багатьох галузях, тоді як такі галузі, як виробництво, охоплюють спеціалізовану робототехніку. Дійсно, зусилля з цифрової трансформації багатьох компаній вже йдуть повним ходом: майже три чверті глобальних організацій назвали цей процес своїм головним ІТ-пріоритетом у 2022 році порівняно з приблизно половиною у 2021 році.

У 2021 році світові витрати на цифрову трансформацію досягли 1,59 трильйона доларів США, що на понад 20 відсотків більше, ніж у попередньому році. Вважається, що пандемія активізувала зусилля щодо цифрової трансформації, оскільки зростання віддаленої роботи спонукало підприємства використовувати хмарні технології. Справді, адаптація існуючих ІТ-рішень з використанням хмарних розширень була найпоширенішим підходом до цифрової трансформації серед організацій по всьому світу у 2022 році, при цьому світовий ринок загальнодоступних хмар, за оцінками, сягнув понад 490 мільярдів доларів США. Станом на 2022 рік майже 90 відсотків організацій у всьому світі впровадили хмарні технології, що є найвищим показником впровадження серед усіх нових технологій [2] (табл. 1).

Статистика відображає тенденції зміни розміру доходів від інформаційних технологій (ІТ) на ринку технічних споживчих товарів у Західній Європі з четвертого кварталу 2015 року до першого кварталу 2020 року. До кінця першого кварталу 2020 року виручка досягла 13,86 млрд євро [2].

Таблиця 1 – Доходи від інформаційних технологій (IT) у Західній Європі з 4 кварталу 2015 р. по 1 квартал 2020 р. (у мільярдах євро)

Періоди	Виручка у мільярдах євро
1 квартал 2020 р.	13,86
4 квартал 2019 р.	16,44
3 квартал 2019 р.	12,98
2 квартал 2019 р.	12,29
1 квартал 2019 р.	16,56
4 квартал 2018 р.	17,06
3 квартал 2018 р.	13,6
2 квартал 2018 р.	12,44
1 квартал 2018 р.	14,24
4 квартал 2017 р.	16,3
3 квартал 2017 р.	13,22
2 квартал 2017 р.	11,81
1 квартал 2017 р.	13,46
4 квартал 2016 р.	16,48
3 квартал 2016 р.	12,66
2 квартал 2016 р.	12,21
1 квартал 2016 р.	13,7
4 квартал 2015 р.	18

Джерело: *Information technology (IT): revenue in Western Europe, 4Q 2015 – 1Q 2020* Published by Statista Research Department, July 7, 2023. URL: <https://www.statista.com/aboutus/our-research-commitment>

Магістральний інструментарій функціонування технологічних пакетів Індустрії 4.0 – алгоритмізація всіх відтворювальних процесів. Магістральна умова реалізації цих пакетів - цифровізація максимально великої кількості процесів відтворення, його управління. І тут треба відзначити, що туризм був одним з перших секторів послуг, які ще на початку створення Індустрії 4.0 оцифрували багато своїх бізнес-процесів і в глобальному, і в національному масштабах: управління продажами авіаквитків і бронювання готелів були піонерами в області цифрових технологій ще у ХХ столітті. Розробка алгоритмів управління відтворенням у туристичній сфері на початку ХХІ століття сприяла бурхливому зростанню світового туристичного ринку, що випереджає інші сфери діяльності світової економіки п'ятого технологічного укладу. І тут спрацював ефект взаємного посилення дії факторів: зростання обсягів світових туристичних потоків (і супровідних їх cashflow) призвело до інтересу інвестиційних фондів до фінансування технологічних новацій, впровадження технологій Індустрії 4.0: Big Data та AI при формуванні нових та оптимізації існуючих дестинацій, 5G та VR&AR у маркетингу та реалізації турпродуктів регіонів, Robotics при управлінні сервісом у місцях розміщення та громадського харчування тощо [3]. Все перераховане вище забезпечило запуск нового циклу «фінансування – відтворення»: нове зростання туристських потоків і приплив нових інвестицій у туристичну сферу світової економіки. Але наслідки протиепідемічних COVID-19 заходів 2020-2021 років, що супроводжуються обвальним зниженням показників світового та

вітчизняного ринку подорожей та відпочинку, вимагають пошуку нових інноваційних шляхів розвитку туризму.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Технологічний зміст четвертої промислової революції визначає параметри відтворювальних процесів практично у всіх галузях і сферах сучасної економіки. Аналіз робіт дослідників цього феномену, наприклад Майкла Портера та Джеймса Хаппелманна [4] та багатьох інших дозволяє нам констатувати, що з технологічної точки зору поточна виробнича революція базується на декількох взаємопроникних технологічних пакетах. Деякі з них, такі як обробка великих даних (Big Data), високошвидкісний Інтернет та Інтернет речей (5G&IoT), штучний інтелект (AI), роботизація (Robotics), віртуальна та доповнена реальність (VR&AR), мають значний вплив на відтворювальні процеси у сфері туризму.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Мета даної роботи – провести аналіз впливу четвертої промислової революції на туристську сферу, відображену у матеріалах всесвітніх організацій туризму, виявити тенденції інноваційних технологічних змін, визначити на їх основі технологічні параметри інноваційних турпродуктів, умов отримання інноваційної економічної переваги при їх відтворенні.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасний туристичний сектор зазнає значних змін та інновацій завдяки новим технологіям, які широко застосовуються в індустрії. Тревел-технології, чи технології у сфері подорожей, стали невід'ємною частиною сучасного туризму. Розвиток нових технологій та їх застосування у сфері подорожей надають перспективи для подальшого прогресу та інновацій у туризмі.

Глобальна цифровізація безпосередньо впливає на сферу туризму. Світові тренди в туризмі включають чотири основні тенденції: платформи, sharing есоному, революцію вражень та технологічні гаджети:

- цифрові платформи надають споживачам доступ до всього світу, а туристичним компаніям стимул для впровадження кращих світових практик;
- Sharing Economy докорінно змінює ролі між постачальниками споживачами туристичних послуг;
- революція вражень: онлайн відгуки, реєг reviews та контент, що генерується туристами – все це посилює позиції споживачів;
- технологічні гаджети – пристрої, інтернет-речей, чат-боти, віртуальна реальність – перевертають уявлення про майбутнє туризму.

Під час випереджального зростання обсягів туристської сфери світової економіки (до 2020 р.) вже формувалося усвідомлення того, що розвиток та стійкість в умовах Індустрії 4.0 забезпечуються інноваційним управлінням, якісною зміною технологічних рішень, які дозволяють радикально підвищити продуктивність різних секторів економіки та соціальної сфери. При цьому безперервно зростаюча складність виробничих взаємозв'язків в Індустрії 4.0 вимагає збільшення складності змісту технологій управління, що відповідає

п'ятому технологічному устрою управління відтворенням.

Таблиця 2 – Впровадження штучного інтелекту (ШІ) у всьому світі у 2022 році за галузями та функціями

Характеристика	Людські ресурси	Виробництво	Маркетингові продажі	Розробка продукту/ послуги	Ризик	Сервісні операції	Стратегія та корпоративні фінанси
Всі галузі	11 %	8 %	5 %	10 %	19 %	19 %	21 %
Ділові, юридичні та професійні послуги	11 %	10 %	9 %	8 %	16 %	20 %	19 %
Споживчі товари/роздрібна торгівля	14 %	4 %	3 %	4 %	15 %	31 %	29 %
Фінансові послуги	1 %	8 %	7 %	31 %	17 %	24 %	23 %
Охорона здоров'я/фармацевтика	15 %	7 %	2 %	4 %	22 %	12 %	8 %
Високі технології/телекомунікації	6 %	6 %	4 %	7 %	38 %	21 %	25 %

Джерело: AI Adoption in Organizations Around the World in 2022 by Industry and Function Published. Bergur Thormundsson, September 28, 2023. URL: <https://www.statista.com/aboutus/our-research-commitment/3204/bergur-thormundsson>

Послуги інформаційних технологій (ІТ) – це послуги, які використовуються організаціями для створення, управління та доставки інформації, а також для надання допомоги у виконанні інших бізнес-функцій. Послуги включають консалтинг, розробку програмного забезпечення, системну інтеграцію, а також розгортання обладнання та навчання. Загалом ширший ринок ІТ-послуг складається з кількох сегментів, включаючи аутсорсинг, керовані послуги, послуги безпеки, керування даними та хмарні обчислення. Як правило, прибутковість компаній галузі залежить від їхньої здатності впроваджувати інновації у свої послуги та розширювати свій технічний досвід. Насправді, як середні, так і великі компанії можуть конкурувати у цій галузі: великі компанії пропонують ширший спектр послуг і мають глобальне охоплення, тоді як дрібніші компанії, зазвичай, позиціонують себе у нішевих ринках і більш конкретно адаптують свої пропозиції до потреб клієнтів. Найбільш істотно зростаючим сегментом ІТ-послуг є хмарні обчислення, які стимулюють інновації, пов'язані з ІТ.

Штучний інтелект (ШІ) є передовою ініціативою в галузі цифрової трансформації, проте темпи впровадження технологій ШІ сильно різняться в різних секторах бізнесу. Сектор технологій та телекомунікацій лідирує, демонструючи високі темпи впровадження у розробці продуктів та послуг, тоді як фінансові послуги використовують ШІ в операціях обслуговування. Впровадження штучного інтелекту та машинного навчання дозволить

керівникам приймати інтелектуальні рішення за допомогою прогнозного моделювання та покращити обслуговування клієнтів за допомогою персоналізації та автоматизованих чат-ботів. Проте складнощі, пов'язані з впровадженням ШІ, встановлюють високу планку для входу, створюючи проблеми для невеликих організацій з обмеженими бюджетами.

Штучний інтелект широко використовується у сфері послуг, стратегії та корпоративних фінансів, причому майже у всіх галузях повідомляється, що у цих функціях використовується близько 20 відсотків ШІ. Найбільше використання ШІ під час виробництва продуктів спостерігалось у сфері фінансових послуг: у 2023 році ШІ використали понад 30 відсотків респондентів. Використання ШІ у виробництві та маркетингу невелике, оскільки вони можуть вимагати індивідуальних людських інстинктів і, отже, важче піддаються використанню до додатків ШІ (табл. 2) [5].

Цифровізація на рівні окремих підприємств галузі туризму та гостинності акцентується і проявляється у цифровізації бізнес-процесів. Всі бізнес-процеси можна розділити на такі види:

- менеджери (управлінці), які забезпечують управління підприємствами туристичної індустрії в цілому, сюди відносяться бізнес процеси стратегічного та поточного планування, маркетингу, адміністрування на рівні підприємства;
- операційні, які включають бізнес-процеси, що забезпечують поточну діяльність підприємства індустрії туризму, включаючи бронювання заявок, формування туристичного продукту, прийом та реєстрацію гостей і т.ін;
- забезпечуючі, які включають бізнес-процеси, пов'язані з контролем за фінансово-економічною діяльністю, технологічні процеси і ін.

Цифровізація змінює спосіб взаємодії компаній із клієнтами. Цей процес дозволяє фірмам отримувати інформацію про своїх клієнтів та розробляти пропозиції, які ідеально підходять для конкретного туриста з точки зору якості, ціни, обслуговування та способу доставки. Це досягається за рахунок масового використання смартфонів та додатків для них.

Тревел-технології - це застосування нових інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) в індустрії туризму. Вони охоплюють широкий спектр інструментів та рішень, які покращують процеси планування, бронювання та організації подорожей. Тревел-технології дозволяють туристам та професіоналам туристичної галузі отримувати доступ до інформації, спілкуватися, бронювати послуги та робити платежі в ефективній та зручній формі.

Особливості тревел-технологій [6]:

1. Онлайн-бронювання та планування: Однією з головних особливостей тревел-технологій є можливість онлайн-бронювання та планування подорожей. Туристи можуть шукати та порівнювати пропозиції щодо розміщення, авіаквитків, турів та інших послуг, вибирати найбільш підходящі варіанти та здійснювати бронювання в режимі реального часу.

2. Мобільні програми: Тревел-технології включають розробку мобільних додатків для мандрівників. З їх допомогою туристи можуть отримувати інформацію про пам'ятки, маршрути, міста, місцеві події та транспортні засоби, а також здійснювати бронювання, отримувати повідомлення про

статус польотів та багато іншого.

3. Штучний інтелект та аналітика: Технології штучного інтелекту та аналітики відіграють важливу роль у тревел-індустрії. Вони дозволяють аналізувати дані про поведінку та уподобання туристів, пропонувати персоналізовані рекомендації та створювати унікальні подорожі, враховуючи індивідуальні потреби кожного клієнта.

Переваги тревел-технологій:

1. Зручність та доступність: Тревел-технології значно спрощують процес планування та бронювання подорожей. Туристи можуть отримувати доступ до інформації та послуг у будь-який час та з будь-якого місця за допомогою комп'ютерів, смартфонів та планшетів. Це дозволяє скоротити тимчасові та фізичні обмеження при виборі та організації подорожей.

2. Більший вибір та конкуренція: Завдяки тревел-технологіям туристи мають доступ до широкого вибору пропозицій та можуть порівнювати ціни, умови та відгуки про різні послуги. Це стимулює конкуренцію серед постачальників послуг та дозволяє туристам вибрати найбільш підходящі варіанти за своїми перевагами та бюджетом.

3. Персоналізація та індивідуальність: Тревел-технології дозволяють пропонувати персоналізовані рішення та послуги, враховуючи індивідуальні потреби та переваги кожного туриста. Автоматичні системи рекомендацій, засновані на аналізі даних, можуть запропонувати унікальні маршрути, активності та розваги, що відповідають інтересам та перевагам мандрівників.

Глобальна цифровізація заснована на використанні платформних бізнес-моделей. Цифрові платформи забезпечують збирання та обробку великих потоків інформації та створюють нове інформаційне середовище туризму. Вони є універсальними інструментами, що дозволяють різним суб'єктам ринку взаємодіяти між собою в режимі онлайн. Адаптувати нову технологію, що набула такого широкого поширення, як штучний інтелект, - непросте завдання. Існує безліч проблем, пов'язаних як із використанням самої технології, так і з проблемними діями зовнішніх агентів. Компанії вважали, що кібербезпека є головним серед ризиків, які необхідно знизити при адаптації ШІ у 2022 році [7]. Крім того, дотримання нормативних вимог було серйозною проблемою, що зумовлена гострою необхідністю поважати конфіденційність інформації серед користувачів.

Accenture, вартість бренду якої склала близько 39,9 млрд. доларів США, була найціннішим постачальником ІТ-послуг у світі в 2023 році. IBM посіла четверте місце з вартістю бренду майже 10,6 млрд. доларів США, а Capgemini зайняла п'яте місце (табл. 3). Дослідження Booking.com показало, що третина аудиторії світових мандрівників зацікавлена у допомозі штучного інтелекту у плануванні поїздок. Люди залишають про себе багато інформації в мережі через запити в пошукових системах, розкривають переваги, показуючи найбільш зручні способи оплати та обсяг запланованих на відпочинок витрат. Для 50% респондентів виявилось неважливим, хто допомагає в плануванні поїздки – живий оператор або чат-бот. Якщо сервіс вибору туру або бронювання готелю запропонує відповідний варіант, то ймовірність його придбання значно підвищується. Великі он-лайн-сервіси продовжать

розвивати власні технології штучного інтелекту, їх досвід поступово підхоплюють і дрібніші гравці.

Таблиця 3 – Рейтинг ІТ-компаній світу у 2023 році за вартістю брендів (у мільярдах доларів США)

Характеристика	2023 рік	2022 рік	2021 рік
Accenture	39,87	36,19	26
TCS	17,19	16,79	14,9
Infosys	13,01	12,78	8,4
IBM (IT-services)	11,58	10,58	16,1
Capgemini	9,76	8,17	6,75
NTT Data	8,92	5,76	5,1
Cognizant	8,63	8,74	8
HCL	6,54	6,1	5,5
Wipro	6,23	6,36	4,3
Fujitsu (IT-services)	4,29	3,95	-

Джерело: The world's leading IT services companies in 2023 by brand value. Published by Statista Research, August 21, 2023. URL: <https://www.statista.com/aboutus/our-research-commitment>

Експерти компанії Amadeus, що є однією з найбільших у світі глобальних цифрових дистриб'юторських систем, вважають, що в постковідний період індустрія туризму і подорожей повинна увійти більш стійкою і більш цифровою, ніж будь-коли раніше. Технології відіграватимуть вирішальну роль як фактор, що сприяє та прискорює процес відновлення. З правильною політичною основою розробка та впровадження нових технологій прискоряться з метою зниження ризиків, усунення розбіжностей та підвищення впевненості споживачів у безпеці майбутніх поїздок. Компанія Amadeus аналізує, як зміниться поведінка мандрівників і вже розробляє вдосконалені безконтактні можливості самообслуговування та автоматизації, а також створює масштабовану інфраструктуру нового покоління, необхідну для врахування коливань у роботі авіакомпаній та пасажирському попиті.

Прогрес у технологіях машинного навчання та штучного інтелекту є потенційно найбільш фундаментальним фактором, що впливає на економіку та соціальне життя. Одна з реалізацій технологій даного класу пов'язана з новими типами інтерфейсів взаємодії людини з машиною, заснованими на здатності штучних систем до розпізнавання мови та передбачення поведінки на основі попереднього досвіду. Такі технології забезпечують можливість «природної» комунікації між людиною і машиною, а також здатність останньої передбачати бажання людини і тому визначати свої дії. З приблизно 10-15 загальних актуальних технологічних тенденцій, що виділяються аналітиками, для готельного та ресторанного бізнесу, як здається, найбільше значення мають п'ять. У таблиці 4 наведено їх ключові можливості та бар'єри реалізації в секторі HORECA.

В ідустрії гостинності агентські інтерфейси можна використовувати як мінімум для двох типів завдань. По-перше, це взаємодія з клієнтом при первинному (віддаленому) контакті, наприклад при бронюванні номера готелю

або столика ресторану, при отриманні уточнюючої інформації про меню, цінах, місцезнаходження об'єкта тощо. Використання подібних технологій дозволить значно скоротити витрати на роботу колл-центрів і менеджерів по роботі з клієнтами, позбавить персонал рутинних комунікативних контактів, пов'язаних з високим рівнем стресу і емоційним вигорянням. По-друге, розмовний ШІ може використовуватися безпосередньо у місці надання послуги для взаємодії з клієнтом. Така взаємодія може, з одного боку, виконувати розважальну функцію, а з іншого - використовуватися для збору та аналізу даних про клієнта, його звички та бажання, а відповідно, для формулювання пропозицій, які можуть виявитися затребуваними. Непрямий, але не менш важливий вплив на індустрію гостинності може надати використання ШІ та предиктивних технологій безпосередньо інтернет-компаніями, в рамках рекомендаційних та рекламних сервісів [9], від яких буде залежати вірогідність вибору конкретної компанії споживачем.

Таблиця 4 – Можливості реалізації ключових технологічних тенденцій у секторі HORECA

Технологічна тенденція	Можливості
Поширення агентських інтерфейсів	Зниження витрат за взаємодію із споживачами; розширення споживчого досвіду
Використання блокчейн-технологій	Підвищення якості та прозорості закупівельної діяльності та логістики
Використання біометричних даних	Нові можливості оплати та обслуговування
ІоТ («Інтернет речей»), 5G та розумні міста	Підвищення можливостей автоматизації бізнесу, розширення логістичних можливостей
Робототехніка	Радикальний приріст автоматизації бізнесу, можливості для розвитку нових концепцій та бізнес-моделей

Джерело: Perboli G., Musso S., Rosano M. Blockchain in logistics and supply chain: a lean approach for designing real-world use cases. IEEE Access. 2018. № 6. p. 62018-62028.

Блокчейн-технології залишаються однією з найбільш важливих та перспективних технологій, пропонуючи принципово нові механізми контролю та прозорості операцій та транзакцій. У сфері HORECA основним потенційним способом застосування блокчейну є забезпечення прозорості логістики та поставок. Особливо актуальна дана технологія для управління ланцюгами постачання продуктів харчування [8].

Оплата на основі використання біометричних даних (насамперед, на основі технологій розпізнавання осіб) є більш перспективним напрямом. Використання електронних засобів оплати – один з основних напрямів цифровізації в індустрії гостинності, та їх подальший розвиток є неминучим. Можливість проводити оплату без використання будь-яких фізичних платіжних коштів (готівки, банківської картки, смартфона) може виявитися затребуваною

у певних соціальних груп, а великі фінансові компанії вже активно впроваджують системи збору біометричних даних.

IoT, 5G та розумні міста: три названі напрямки технологічного розвитку тісно пов'язані один з одним і мають розглядатися в одному контексті. «Інтернет речей» (IoT) – технології взаємодії великої кількості різних видів техніки, що дозволяють їм збирати велику кількість різнорідних даних, обмінюватися ними та відповідним чином змінювати свої завдання та дії. 5G – стандарт телекомунікацій нового покоління з великою пропускнуою здатністю, необхідною для взаємодії у системах IoT. Розумні міста – це комплексні організаційно-технічні рішення, що забезпечують функціонування міського господарства та інфраструктури на основі IoT та систем штучного інтелекту.

Застосування як окремих роботів, так і складніших кіберфізичних систем, що поєднують цілу низку фізичних систем, керованих комп'ютерними системами, є однією з найстаріших концепцій автоматизації готельного та ресторанного бізнесу. Китайські та інші ресторани вже мають у «штаті» роботів-офіціантів; японська мережа Еронотакі тестує робота-бармена; американська мережа готелів Adolf використовує робота-дворецького; експериментальний готель у Токіо «The Henn na Hotel» прагне роботизувати максимальну кількість операцій, знижуючи до мінімуму використання людської праці. Крім цього потенційний ризик використання роботів (а також систем ШІ), як і в інших галузях, пов'язаний з витісненням персоналу. Ця проблема є найбільш актуальною не так для підприємств, як для місцевої влади та суспільства в цілому, оскільки є частиною однієї з ключових проблем найближчого майбутнього - поєднання загрози масовому безробіттю з дефіцитом висококваліфікованої робочої сили. ШІ вплине на потреби країн світу в робочій силі. З багатьох професій найбільший ризик автоматизації надається офісній та адміністративній підтримці. Це лінійні та шаблонні посади, багато їх обов'язків можна делегувати просунутим програмам.

Широке впровадження нових цифрових процесів стимулювало переоцінку ролі робочої сили, оскільки деякі технології потребують спеціальних навичок та компетенцій. Хоча нові співробітники часто відіграють центральну роль у будь-якій трансформації бізнесу, все більша частка організацій приділяє особливу увагу підвищенню кваліфікації чи перепідготовці існуючих співробітників за допомогою програм навчання та розвитку. Наприклад, чверть організацій по всьому світу планували розгорнути програми аналізу даних чи аналітики у 2022 році порівняно з 18 відсотками у 2021 році, а 30 відсотків планували запустити програми цифрової швидкості або трансформації. Для співробітників цифрове підвищення кваліфікації є засобом досягнення успіху на ринку праці, причому інтерес до навчання цифрових навичок особливо високий у країнах з економікою, що розвивається, таких як Індія та Китай [10].

Для виявлення глобальних тенденцій технологічних рішень у сфері світового туризму було проаналізовано матеріали, представлені на останньому «допан-демійному» міжнародному форумі Всесвітньої туристської організації, UNWTO – «World TravelDay & Innovation-2019». У них було зазначено, що в резолюції секції «Вплив технологій на туризм» підтверджено,

що майбутнє подорожей - за технологіями 4.0, коли «використання сучасних технологій 4.0, визначення розташування, штучного інтелекту, доповненої та віртуальної реальності» [11] сприятимуть вирішенню таких проблем, як сезонність та перенаселеність, овербукінг. Треба зазначити, що на тому ж форумі було виділено спеціальну секцію «Четверта промислова революція», в резолюції якої було зазначено, що «цифровий сектор туризму повинен запроваджувати нововведення та створювати нові можливості для бізнесу, щоб забезпечити подальшу конкурентоспроможність, зростання та сталий розвиток сектора» [12].

Перехід туристських і готельних підприємств на цифрові технології передбачає:

- розвиток каналів передачі та зберігання великих обсягів інформації;
- широке використання Інтернету у всіх бізнес-процесах;
- інтеграцію цифрових технологій на рівні основних бізнес-процесів підприємства туристичної індустрії;
- забезпечення інформаційної безпеки підприємства туристичної індустрії;
- постійний розвиток персоналу підприємства туристичної індустрії та підвищення рівня цифрових компетенцій.

Слід виділити ключові фактори, що впливають на цифровізацію бізнес-процесів у туризмі:

- глобальна цифровізація;
- зміна поколінь та формування нового типу цифрових мандрівників;
- поява економік нового типу Sharing Economy, економіки вражень;
- нові технології ведення бізнесу, в яких принципово змінюються взаємозв'язки учасників ринку та реалізується максимальне уникнення від посередників (наприклад, Uber);
- віддалений доступ до послуг (онлайн турагентства);
- персоналізація послуг підприємств туристичної індустрії;
- посилення впливу самих мандрівників на індустрію туризму за рахунок публікації відгуків, що надає істотний вплив на переваги майбутніх туристів. Sharing Economy докорінно змінює ролі між постачальниками та споживачами туристських послуг, наприклад, це повною мірою реалізовано у системі Airbnb.

Поняття «розумний туризм» (smart tourism), його потенціал нині активно обговорюються та вивчаються на міжнародних майданчиках. Так, у ділових програмах найважливішого щорічного заходу світової туристичної індустрії World Travel Market (London) і в 2019 році, і в проекті на 2020 рік, розумний туризм представлений «одним із найперспективніших трендів» [13].

Smart-туризм, його параметри багаторазово розглядалися на форумах Всесвітньої туристичної організації, UNWTO, по-перше, на Генеральній асамблеї UNWTO-2019, по-друге, на міжнародному форумі UNWTO «World TravelDay & Innovation-2019» у секції «Вплив технологій на туризм», по-третє, на секції «Туризм у цифрову еру» та на спеціальній секції «Четверта промислова революція» [12].

Для формування основних параметрів smart-туризму необхідно згадати і характеристики smart-продуктів «взагалі», і параметри розумного виробництва як їхнього джерела. У загальних рисах про появу smart-продуктів як

результату розумного виробництва дослідники заявили відразу після визнання існування індустріальної революції 4.0, наприклад, Майкл Портер і Джеймс Хаппелманн [14]. На їх основі нами були сформульовані основні відмінні ознаки розумного виробництва для туристичної індустрії:

- новий стратегічний ресурс - цифрові дані, Big Data, переведення всієї інформації про виробництво у цифровий вигляд;

- нові технології присутні у всьому виробничому циклі: нові джерела енергії, нові матеріали, нова реалізація тощо; розумне обладнання саме себе оптимізує;

- центр доданої вартості переміщується у результати R&D (НДДКР); корекції у формуванні турпродукту відбуваються безперервно, в режимі реального часу; розумне виробництво – не конвеєр, а платформа (туристична технологічна платформа). Але тут треба пам'ятати, що цифровізація процесів відтворення є лише інструментом реалізації технологічних пакетів 4.0 у створенні smart-виробництва. Взаємозв'язки технологій 4.0 та розумного туризму були виявлені у дослідженнях Міжнародного центру вивчення туризму та гостинності Борнмутського університету. У них знайдено, що розумний туризм - це не просто використання передових технологій у туристичній індустрії, а інтеграція всіх суб'єктів туристичної сфери, де «мандрівники стають не споживачами, а повноцінними учасниками, починають робити свій внесок у створення турпродукту, створення нової екосистеми» [15].

Сьогодні цифрові рішення – ключовий аспект розвитку туризму у всіх елементах ланцюжка створення вартості. У туристичній та готельній діяльності застосовують такі цифрові технології:

- великі дані (Big Data);

- Інтернет речей (Internet of Things - IoT та IIoT - Industrial Internet of Things);

- штучний інтелект;

- чат-боти;

- доповнену реальність;;

- мобільні пристрої тощо.

Технологія Big Data дозволяє обробляти великі обсяги інформації, проводити різні види маркетингових аналітичних досліджень, отримувати вичерпну інформацію про туристів, що вкрай важливо для розробки стратегії розвитку туроператора. Крім того, наявність великого обсягу інформації про туриста дозволяє забезпечити персоналізований підхід при роботі з клієнтами, що є одним з факторів забезпечення конкурентоспроможності туроператора.

Технології Internet of Things використовуються в основному в готельному бізнесі і разом з технологіями розумного будинку забезпечують комфортне перебування гостя в готелі.

Дослідження Booking.com показало, що третина аудиторії світових міжнародних туристів зацікавлена у допомозі штучного інтелекту у плануванні поїздок та персоналізованому обслуговуванні. Додаток Voice of Customer (NeosVoc) дозволяє збирати та обробляти інформацію про переваги клієнтів з метою надання персоналізованого обслуговування. Додаток компанії Mezi

створює маршрут ідеальної подорожі на основі аналізу повідомлень користувача, пошукових запитів та іншої інтернет-активності.

Чат-боти виступають у ролі віртуальних помічників туристів при плануванні поїздки. Вони можуть накопичувати інформацію про потенційного туриста, його переваги і побажання, потім використовувати її при наступних зверненнях, роблячи пропозиції більш персоналізованими (FCM Travel Solutions, SnapTravel).

Технології доповненої реальності використовуються як інноваційний інструмент при організації та проведенні екскурсій. Booking.com надає сервіси віртуальних екскурсій готелями, в обрану точку планети. 64% туристів вважають за краще зробити VR-тур у пункт призначення перед оплатою поїздки.

Мобільні пристрої стали невід'ємним атрибутом туристів. Існуючі мобільні додатки можуть забезпечити бронювання послуг, надати довідкову інформацію. З метою підвищення конкурентоспроможності підприємств туристичної індустрії та зручності клієнтів туроператорам доцільно створювати власні мобільні додатки. Нинішнє покоління людей активно користується мобільними пристроями, що носяться, і потенційним клієнтам зручніше відразу заходити в додаток і бачити перелік пропонованих туркомпанією туристських продуктів, форму електронного договору, іншу довідкову інформацію. У додатку можна передбачити різні способи оплати та передоплати туристського продукту, адже клієнтам буде набагато зручніше здійснювати платежі через мобільний додаток.

Повертаючись до загальносвітових масштабів сучасного туризму в ракурсі основних технологічних рішень, внесених Індустрією 4.0 у сферу подорожей та туризму, було розглянуто матеріали Всесвітньої ради подорожей та туризму, WTTC. В них було визначено формуючі майбутнє туризму «5 взаємопов'язаних мегатрендів» [16].

З п'яти представлених мегатрендів майбутнього туризму два (1 і 2-й) безпосередньо пов'язані з технологічними пакетами 4.0, і їх можна назвати технологічними мегатRENдами. Інші є опосередкованим наслідком загальних соціальних змін, що супроводжують поточну технологічну революцію, за своєю суттю вони більше відносяться до мегатрендів соціальних. Вплив соціальних мегатрендів майбутнього у турбізнесі проявляється у вигляді активного споживання нових напрямків та видів туризму з новими соціальними технологічними параметрами. Було виявлено, що протягом останніх 5 років виріс на 21% [17] попит на різні види іммерсивного туризму: Glamping (гламурний кемпінг), Experiential travel (кардинально новий досвід та переживання, здатні «перезапустити» учасників) та Sports travel (ставити рекорди в улюбленому виді спорту на відпочинку). Вплив технологічних мегатрендів було знайдено в тому, що цифровізація показників міської інфраструктури «Розумне місто», наприклад, дозволила виявити нездатність місцевих мереж транспорту та каналізації витримати зростання туристичного потоку в деякі малі американські міста [18].

Трансформація взаємодії продавців та покупців у сфері туризму торкається зокрема, і глобальні системи дистрибуції. На сьогоднішній день

вже існує перспективний проект WindingTree, заснований на блокчейн-платформі і що забезпечує взаємодію дія всіх учасників виробничого процесу. У перспективі дана система або подібні до неї має реальні шанси на витіснення з ринку гігантів GDS. Варто відзначити, що програмне забезпечення багатьох GDS базується на відносно старих технологіях і не може конкурувати з сучасними цифровими платформами, які мають безперечні переваги. Наприклад, WindingTree пропонує спрощений процес взаємодії, що виключає необхідність витрат на високу комісію додатковим посередникам, забезпечує безперебійну роботу системи завдяки функціонуванню на основі блокчейн-технології. Цей проект уже впроваджено в авіакомпанії Lufthansa, аналогічні блокчейн інструменти застосовуються в аеропорту Дубая, транспортній системі Японії та Південної Кореї та ін. Цифрова платформа Winding Tree об'єднує покупців та продавців на єдиному майданчику за допомогою смарт-контрактів. Блокчейн платформа TravelChain призначена для збору та обробки великих масивів інформації про туристів, при цьому використання технології штучного інтелекту дозволяє забезпечувати персоналізоване обслуговування клієнтів, ґрунтуючись на обробці інформації про них [19].

Для реалізації системного підходу в мегатрендах майбутнього туризму в напрямку розвитку розумного туризму для організації комунікаційного майданчика вироблення перспективних шляхів технологічного розвитку інноваційного відтворення регіональних турпродуктів, було запропоновано застосувати саме платформенний підхід, спрямований на побудову туристичної технологічної платформи.

Слід зазначити, що успішний економічний досвід побудови європейських технологічних платформ спонукав до створення технологічних платформ у багатьох галузях: у медицині та біотехнологіях, авіакосмічній та транспортній, ядерній енергетиці та металургії. У туристичній галузі також були реляції про побудову технологічних платформ. Але на практиці поки що створюються лише банальні цифрові маркетплейси. Функціонально вони спеціалізуються лише на процесах продажу туристських послуг і здатні самостійно вирішити ситуації, так звані *disruption* (щось пішло не так). Але платформний підхід бачиться в інтеграції відтворення регіональних турпродуктів. Одним із елементів побудови туристської технологічної платформи може стати «Платформа «Туризм 4.0» [19].

Побудова туристської технологічної платформи вже має розвинений цифровий базис. Як було зазначено раніше, туристична сфера світової економіки давно має у складі вироблених нею турпродуктів багато елементів цифрового продукту: бронювання готелів та авіарейсів, реєстрація в аеропортах та готелях, замовлення таксі та екскурсій, електронні візи та перекладачі, віртуальні геокарти та багато іншого. Але запуск процесів відтворення *smart*-турпродуктів стане можливим лише з урахуванням консолідації цих дискретно діючих інструментів. *Smart*-турпродукти – це системність виробництва з усіма технологіями, інноваціями, стійкістю, доступністю та інклюзивністю. Крім того, *smart* регіональні турпродукти - це процвітаючі регіони, де місцеві жителі не тільки отримують нові робочі місця,

а й спільно з туристами визначають напрями сталого розвитку туризму, беручи до уваги взаємні інтереси: культурні особливості, сезонність, екологічну ємність та багато іншого. Інструментарій туристської технологічної платформи дозволяє постійно та точно вимірювати, інтегрувати та аналізувати дані для прийняття рішень, розстановки пріоритетів та прогнозування проблем для ефективного управління місцевими ресурсами, гнучко реагувати на зміни потреб та можливостей у напрямку створення повноцінних smart регіональних турпродуктів.

В останні роки онлайн-туроператори (ОТА) стають все більш важливим каналом продажів, проте на ринку туризму з'являються ще більш впливові та «вагомі» учасники. Так, про свої амбіції стати комплексним провайдером вже заявила компанія Airbnb [URL: profi.travel/articles/44636/details]. Все разом це «пов'язаний досвід», який дозволяє концентрувати в одних руках максимум витрат клієнтів на планування поїздки. Для готельєрів та інших постачальників послуг це означатиме подальший тиск на канали прямого продажу та зростання витрат.

Але існують й інші зміни щодо доходів готелів. Проблема паритету цін так і не зникла повністю, тому крах малих та великих ОТА продовжиться. 14 вересня 2019 р. про своє банкрутство оголосив популярний сервіс бронювання готелів та апартаментів Amoma.com, який мав дуже привабливі ціни. У результаті сервіс перетворився на «фінансову піраміду», багато клієнтів втратили гроші. Зараз, за даними Phocuswire [URL: phocuswire.com/ota-insight-hospitality-forecast-2020], така доля очікує ще кількох незалежних учасників. У зв'язку з цим власникам готелів та іншим постачальникам послуг варто якнайбільше уваги приділяти прямим продажам та технологіям, що дозволяють розвивати цей канал. 2025-2030 ро. принесуть багато новин в області big-data та штучного інтелекту. В першу чергу, вони будуть використовуватися для взаємодії з мандрівниками, яким потрібний якісніший цифровий та мобільний досвід з відповідями в режимі реального часу.

Поширення таких пристроїв, як Google Home, призведе до того, що клієнти все частіше використовуватимуть голосові команди для пошуку об'єктів розміщення. Це вплине на SEO та маркетингову стратегію готелів і в перспективі стане ще одним істотним каналом продажів, якому варто приділити увагу вже зараз. Усередині компаній триватиме тенденція на розвиток CRM-систем, автоматичних інструментів для постановки завдань та планування. При правильному застосуванні їх використання стане чинником підвищення конкурентоспроможності організації. Інструментарій, що автоматизує роботу, вивільняє для керівної ланки головний ресурс - вільний час. Воно витрачається на вивчення нових технологій ведення бізнесу чи освоєння паралельних ніш. Другий момент особливо важливий в динамічно змінних умовах, коли відсоток самостійних туристів збільшується, і туристичним компаніям для виживання доводиться все більше займатися пошуком нових джерел доходу.

Тренд на відмову від класичної схеми послуг компаній, які продають пакетні тури, посилюватиметься. Мандрівники масово купують авіаквитки за

допомогою сервісу SkyScanner, а Booking.com давно змінив традиційний ринок бронювання номерів у готелях. Аналогічні перспективи автоматизації та переходу на цифру очікують та інші стандартні операції. Одна з них - оформлення страховки. На сьогоднішній день є програми, подібні до Tripinsurance, що дозволяють оформити поліс протягом декількох хвилин. Справа не обмежується видачею документом: у рамках страховки можна отримати цілодобову невідкладну консультацію у відповідного лікаря. Фахівці служби підтримки користуються всіма основними месенджерами.

Цифровізація бізнес-процесів підприємств індустрії туризму та гостинності має базуватися на наступних принципах:

- забезпечувати повнофункціональність і системність – всі бізнес-процеси туристичної компанії та готельного підприємства повинні бути автоматизовані та інформаційно взаємопов'язані в рамках єдиної інформаційно-комунікаційної системи;

- забезпечувати ефективність та високу продуктивність при виконанні всіх бізнес-процесів;

- мати гнучкість та відкритість архітектури, забезпечувати можливість розширення підприємств туристичної індустрії;

- бути масштабованою – ефективно функціонувати за будь-яких обсягів оброблюваної інформації;

- забезпечувати надійність та безпеку зберігання, обробки та передачі великих обсягів інформації;

- забезпечувати діагностику та захист від несанкціонованого доступу;

- забезпечувати адаптацію та налаштування параметрів з урахуванням особливостей конкретного підприємства туристської або готельної індустрії;

- забезпечувати статистичну та аналітичну обробку великих обсягів інформації для прийняття стратегічних рішень, що особливо важливо в умовах високої конкуренції на ринку.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Перспективи тревел-технологій дуже обнадійливі. Розвиток нових технологій, таких як віртуальна реальність, доповнена реальність та блокчейн, відкриває нові можливості для туристичної індустрії. Віртуальні тури та подорожі, можливість відвідати місця та ознайомитись із ріними культурами через VR-технології, а також забезпечення безпечних та надійних платіжних систем з використанням блокчейну – все це може значно змінити спосіб подорожей та надати унікальні та неповторні враження.

ВИСНОВКИ

Використання у сфері туризму технологічних пакетів Індустрії 4.0 дозволяє, по-перше, організувати інноваційне відтворення якісно нових турпродуктів, що відповідають п'ятому технологічному укладу, наприклад, розумних (smart) туристичних продуктів; по-друге, масштабувати попередні напрацювання сфери туризму Індустрії 4.0 на процеси відтворення регіональних туристських продуктів. По-третє, системний підхід в управлінні відтворенням регіональних турпродуктів за допомогою технологічних пакетів Індустрії 4.0 уможливує

створення Технологічної платформи як системи правил та алгоритмів мережевої взаємодії всіх зацікавлених в отриманні проривних конкурентних переваг для її учасників, що функціонує на основі базових та прикладних унікальних технологій, здатних забезпечити стратегічний інноваційний розвиток за обраними напрямками зі значним економічним та соціальним ефектом, туристської технологічної платформи.

На основі аналізу резолюцій UNWTO можна констатувати, що інформаційні та комунікаційні технології в туризмі стали глобальним явищем, а світова індустрія туризму нарощує впровадження нових технологій у дедалі більше своїх відтворювальних процесів, підвищуючи свою ефективність та збільшуючи в регіонах подорожей соціальну та екологічну адаптацію туризму. Тревел-технології є невід'ємною частиною сучасної індустрії туризму. Вони забезпечують зручність, доступність та більший вибір для туристів, дозволяють персоналізувати подорожі та пропонують нові можливості для індустрії.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Sakpal M. 5 Digital technology trends for 2020 / Gartner. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-digital-technology-trends-for-2020>.
- [2] Information technology (IT): revenue in Western Europe, 4Q 2015 – 1Q 2020. Published by Statista Research Department, July 7, 2023. URL: <https://www.statista.com/aboutus/our-research-commitment>
- [3] World Trade Report 2022. The Future of Services Trade. URL: https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/01_wtr22_0_e.pdf
- [4] Porter M. E., Kramer M. R. Strategy and Society: The Link Between Competitive Advantage and Corporate Social Responsibility. Harvard Business Review, December 2006, pp. 78-92.
- [5] AI Adoption in Organizations Around the World in 2022 by Industry and Function Published. Bergur Thormundsson, September 28, 2023. URL: <https://www.statista.com/aboutus/our-research-commitment/3204/bergur-thormundsson>
- [6] Нові технології у туризмі. Туристичні новини. URL: <https://informatoer.ua//tags/turizm>
- [7] The world's leading IT services companies in 2023 by brand value. Published by Statista Research, August 21, 2023. URL: <https://www.statista.com/aboutus/our-research-commitment>
- [8] Perboli G., Musso S., Rosano M. Blockchain in logistics and supply chain: a lean approach for designing real-world use cases. IEEE Access. 2018. № 6. p. 62018-62028.
- [9] Zsarnoczky M. The digital future of the tourism and hospitality industry. Boston Hospitality Review. 2018. № 6. p. 1-9.
- [10] Технології та телекомунікації. Програмне забезпечення. Цифрова трансформація – статистика і факти. URL: <https://www.statista.com/markets/418/technology-telecommunications/>
- [11] The Impact of Technology on Tourism. Tourism and the Digital Transformation. World TravelDay & Innovation. [Електронний ресурс]. URL: <http://wtd.unwto.org/content/wtd-2019-technology-tourism>

- [12] The Fourth Industrial Revolution. Tourism and the Digital Transformation. World TravelDay & Innovation. [Електронний ресурс]. URL: <http://wtd.unwto.org/content/wtd-2018-fourth-industrial-revolution>
- [13] Event programme. World Travel Market. [Електронний ресурс]. URL: <https://london.wtm.com/events/event-programme-2019/#>
- [14] Портер Майкл, Хаппелманн Джеймс Революція у виробництві. Harvard business review. [Електронний ресурс]. URL: <https://hbr/management/strategiya/a16698>
- [15] Focus on smart tourism у World Travel Market. Exhibitionworld.co.uk. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.exhibitionworld.co.uk/2019/11/05/focus-on-smart-tourism-at-world-travel-market>
- [16] World, Transformed: Megatrends and Their Implications for Travel & Tourism. World Travel & Tourism Council. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wttc.org/publications/2019/megatrends-2019>
- [17] Booking a Hotel, Why Not Try Parasailing? Travel Websites Push Experiences. Wsj. com. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wsj.com/articles/travel-websites-push-experiences-1544106026>
- [18] Overrun by Tourists, American Cities Are Taking Aim at Hotels. Bloomberg. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-10-16/america-s-small-cities-are-being-overrun-by-tourists>
- [19] Digital transformation. Unwto. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.unwto.org/digital-transformation>

THE INFLUENCE OF DIGITALIZATION TRENDS ON THE MAIN DIRECTIONS OF TECHNOLOGICAL INNOVATIONS IN THE INDUSTRY OF TOURISM

**Khudaverdiyeva V. PhD, Associate Professor
State biotechnological university / Ukraine**

Abstract. The topicality of the topic is due to the emergence of a new type of so-called "digital tourists" and requires the modernization of the tourism information environment, which is becoming the most important component of modern tourism. At the same time, the level of development of information and communication technologies directly affects all aspects of the organization of the tourist business. Digitization leads to the appearance of virtual trips, online travel companies, spatially distributed network tour operator structures, etc. Technologies of the digital economy make it possible to provide the most personalized interaction that is preferred by most modern travelers.

The article presents an analysis of the impact of the fourth industrial revolution on the tourism sphere of the world economy. The trends of innovative technological changes are considered. Examples of the implementation of technological and social megatrends in the world tourism industry are given. Their compliance with technological packages 4.0 and megatrends of future tourism was evaluated.

Distinctive features of smart production and innovative smart tourism products are formulated, their economic and social effectiveness, prospects for creating a tourist technological platform are indicated.

As a result of the research, the prerequisites for the innovative reproduction of tourism products under the conditions of Industry 4.0, the main technological directions in the trends of world tourism, and the technological parameters of innovative smart regional tourism products were determined. Blockchain provides opportunities to significantly improve the quality and transparency of logistics and procurement activities. The use of biometric data expands the possibilities of payment and use of services that require identification of the visitor. The Internet of Things and smart cities are changing the overall business environment. Social robots and other cyber-physical systems allow you to automate the basic work processes of hotels and restaurants. Given the relative simplicity of the basic content of hotel and restaurant services, the hospitality industry, like many other industries, is under the influence of a number of technological trends. Summarizing the role of already used and promising digital technologies, they can be characterized as a qualitative transition from the digitalization of individual business tasks and processes to the digital transformation of the entire business.

Keywords: industrial revolution 4.0, tourism sector of the economy, digital technologies, digitalization, information technologies, HORECA, tourism technology platform.

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
11.02.2025 р.	24.04.2025 р.	21.06.2025 р.

ЗМІСТ • CONTENTS

Денисюк В. Ю., Лапченко Ю. С. Методика перевірки покращення метрологічних характеристик акустичних датчиків рівня	Denysiuk V., Lapchenko Y.	4
Method of Verification of Improvement the Metrological Characteristics of Acoustic Level Sensors		
Лундук Y. Evaluation and Optimization of Website Efficiency Using Google Pagespeed Insights	Линник Ю. М.	18
Оцінка та оптимізація ефективності веб-сайтів засобами Google Pagespeed Insights		
Луцків М. М., Федина Б. І., Наконечний М. Д. Моделювання тоновідтворення цифрових растрованих зображень при зміні товщини фарби	Lutskiv M., Fedyna B., Nakonechnyi M.	30
Simulation of Tone Reproduction of Digital Rast Images with Change of Paint Thickness		
Молчанов В. Ф., Латишев Д. В. Дослідження і розробка установок для систем експлуатації МОР та методики розрахунку їх параметрів	Molchanov V., Latyshev D.	41
Research and Development of Installations for Coolant Operation Systems and Methods for Calculating Their Parameters		
Пальчевський Б. О. Вдосконалення прогностного технічного обслуговування на основі аналізу процесу деградації стану пакувального обладнання	Palchevskiy B.	51
Improving Predictive Maintenance Based on the Analysis of Packaging Equipment Condition Degradation Process		
Повстяной О. Ю., Русаков Д. С. оптимізація конструкцій обладнання для виготовлення шпону за допомогою програмного забезпечення SolidWorks	Povstianoi O., Rusakov D.	70
Optimization of Equipment Designs for Veneer Production Using SolidWorks Software		
Сапон С. П., Пономаренко С. В., Яровий Ю. В. Інтелектуальні системи управління динамічними характеристиками шпиндельних вузлів. Огляд публікацій	Sapon S., Ponomarenko S., Yarovyi Y.	77
Intelligent Control Systems for the Dynamic Characteristics of Spindle Units: A Review of Publications		
Худавердієва В. А. Вплив тенденцій цифровізації на основні напрямки технологічних нововведень в галузі туризму	Khudaverdiyeva V.	93
The Influence of Digitalization Trends on the Main Directions of Technological Innovations in the Industry of Tourism		

КОЛЕКТИВ АВТОРІВ

ТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ

Науковий журнал

Комп'ютерний набір та верстка: Олег КАЙДИК
Любов КРЕСТЬЯНПОЛЬ

Зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення, як суб'єкта у сфері друкованих медіа (рішення №1413 від 25 квітня 2024 року, ідентифікатор медіа R30-03928).
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Підписано до друку __.06.2025 р. Формат 60x84/8.
Папір офсетний. Гарнітура Аріал.
Цифровий друк. Ум. друк. арк. 13,2. Наклад 50 пр.
Зам. No _____.

Віддруковано з готового оригінал-макета.

Видавництво – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК No 7623 від 22.06.2022 р.



<https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/tcomplex>