

Ю.І. Тирпич [\[0009-0000-4481-707X\]](#)

Національний лісотехнічний університет України

**СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕНЬ
ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ТОЧНОСТІ ДЕРЕВООБРОБНИХ ВЕРСТАТІВ**

Подано аналітичний огляд сучасного стану та перспективних напрямів досліджень технологічної точності деревообробних верстатів. Виокремлено чотири основні напрями досліджень: конструкційне забезпечення точності оброблення, дослідження фактичної точності та динаміки її змін, математичне моделювання та системи автоматичного контролю розмірів деталей у процесі оброблення. Узагальнено результати провідних вітчизняних і зарубіжних дослідницьких шкіл. Визначено перспективні напрями подальших досліджень.

Ключові слова: поздовжньо-фрезерний верстат, точність оброблення, похибка оброблення, моделювання, активний контроль.

Y.I. Tyrpich

**CURRENT STATE AND PROSPECTIVE DIRECTIONS OF RESEARCH ON THE
TECHNOLOGICAL ACCURACY OF WOODWORKING MACHINES**

This article presents an analytical review of the current state and prospective directions of research on the technological accuracy of woodworking machines. Four main research directions have been identified: structural provision of machining accuracy, experimental investigation of actual accuracy and dynamics of its changes, mathematical modelling, and automatic in-process control of part dimensions. It is established that the moving workpiece-feeding system of conventional four-side plano-milling machines contributes up to 60% of the total machining error, while at critical cutting tool wear the actual errors exceed permissible tolerances by up to 3.7 times. The distribution of machining errors is most accurately described by the Weibull law with shape parameter $b = 1.89-3.11$. The most promising direction is the integration of in-process workpiece measurement and machine learning algorithms (Random Forest, CNN, LSTM) for predictive maintenance with prediction accuracy above 99%. Prospective directions for further research are outlined.

Keywords: plano-milling machine, machining accuracy, machining error, modelling, active control.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку деревообробного виробництва характеризується постійним зростанням вимог до якості готової продукції, що безпосередньо залежить від точності механічної обробки деталей. Висока технологічна точність забезпечує взаємозамінність деталей під час складання виробів, зниження матеріальних втрат і підвищення економічної ефективності виробництва [1, 2]. Відповідно до технологічних вимог, допустимі відхилення розмірів брускових столярних деталей становлять $\pm 0,2$ мм при попередній калібрації заготовок та $\pm 0,1$ мм при фінішній обробці [1]. Недотримання цих вимог призводить до необхідності додаткового калібрування деталей перед складанням, що збільшує витрати сировини, енергії та собівартість продукції [3].

Джерелом похибок розмірів деталей у процесі різання деревини є динамічна технологічна система «верстат - різальний інструмент - заготовка» (ВІЗ), у якій сам верстат є найскладнішим і найбільш постійним джерелом похибок [1, 2]. Унаслідок дії механічних і теплових процесів, вібрацій, зношування кінематичних пар, а також температурних і пружних деформацій верстат поступово втрачає свою початкову точність у процесі експлуатації.

Експериментальні дослідження технологічної точності чотирибічних поздовжньо-фрезерних верстатів, що експлуатуються на підприємствах України впродовж 5–18 років, показали, що при критичному зношуванні ножів фрез фактичні похибки обробки перевищують допустимі значення до 3,7 разів за товщиною деталей [1]. Таким чином, забезпечення стабільної геометричної точності деталей у процесі експлуатації верстатів є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого потребує комплексного підходу - від удосконалення конструкцій верстатів і систем базування до впровадження математичного моделювання та автоматичного контролю розмірів безпосередньо у процесі обробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема забезпечення технологічної точності деревообробних верстатів є комплексною, і сучасна наукова спільнота досліджує її за кількома взаємопов'язаними напрямками. Аналіз останніх публікацій дозволяє виокремити чотири основні з них.

Конструкційне забезпечення точності оброблення. Цей напрям зосереджується на параметрах верстатів, які формують їхню початкову точність, - жорсткості станини, точності встановлення напрямних, конструкції систем базування. У роботах [3, 4] проаналізовано вимоги до налаштування чотирибічних поздовжньо-фрезерних верстатів та запропоновано вдосконалення

системи базування заготовок. Чисельні дослідження вібраційних характеристик таких верстатів виконано в [5].

Дослідження фактичної точності та динаміки її змін. Цей напрям ставить за мету експериментально визначити, як змінюється технологічна точність верстата у процесі експлуатації. Закономірності зміни точності упродовж міжремонтного періоду досліджено в роботах [1, 2]. Вплив окремих чинників - затуплення різального інструменту [6, 7, 11] та вимушених просторових вібрацій від дисбалансу [8, 9] - доповнює картину механізмів втрати точності. Методичним аспектам експериментального оцінювання геометричної і кінематичної точності присвячено роботу [10].

Математичне моделювання технологічної точності. Цей напрям дозволяє не лише констатувати втрату точності, а й прогнозувати її та керувати нею. Закономірності розподілу похибок обробки на деревообробних верстатах за законом Вейбулла встановлено в роботі [12], моделі параметричних відмов на основі α -розподілу розроблено в [13, 14]. Окремий потужний підхід реалізує тензорно-геометричне моделювання просторової жорсткості верстата [15], а для конкретних типів обладнання розроблено спеціалізовані моделі [16].

Системи автоматичного контролю розмірів у процесі обробки. Цей напрям є найбільш перспективним, оскільки повністю виключити вплив експлуатаційних чинників неможливо. Огляд класів систем активного контролю та адаптивного керування подано в роботі [17]. Для деревообробних верстатів запропоновано інформаційно-комп'ютерну систему контролю [18]. У серії праць японських [19, 20] і польських [21, 22] дослідників розроблено адаптивні системи з машинним зором для CNC-обладнання. Найновіший напрям - інтеграція машинного навчання для прогнозного обслуговування - узагальнено в [23], а концептуальну модель Machine Tool Ability запропоновано в [24].

Незважаючи на значний обсяг досліджень за кожним із напрямів, у відкритому доступі бракує систематизованого огляду, який би узагальнив сучасні методи дослідження технологічної точності саме деревообробних верстатів і дозволив би швидко орієнтуватися в актуальних підходах. Потреба в такому огляді й зумовила тему даної статті.

Постановка завдань. Метою роботи є систематизація та аналіз сучасних методів дослідження технологічної точності деревообробних верстатів, які формуються на основі чотирьох взаємопов'язаних напрямів - конструкційного забезпечення точності, експериментального дослідження її фактичних значень і динаміки змін, математичного моделювання та автоматичного контролю розмірів деталей у процесі оброблення. Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- проаналізувати конструкційні особливості сучасних деревообробних верстатів та способи забезпечення геометричної точності оброблення;
- узагальнити результати експериментальних досліджень фактичної технологічної точності верстатів і динаміки її змін;
- розглянути сучасні підходи до математичного моделювання технологічної точності;
- проаналізувати системи автоматичного контролю розмірів деталей та перспективи застосування методів машинного навчання;
- визначити перспективні напрями подальших досліджень.

Викладення основного матеріалу. *Конструкційне забезпечення точності оброблення.* Найбільш масовим обладнанням деревообробної галузі для виготовлення профільних та плоских брускових деталей є чотирибічні поздовжньо-фрезерні верстати. Вони призначені для одночасного фрезерування заготовок із чотирьох боків за заданими розмірами поперечного перерізу та складним профілем [4]. Залежно від максимальної ширини оброблення їх поділяють на легкі (до 160 мм, потужність 14–18 кВт), середні (до 250 мм, 20–30 кВт) та важкі (до 650 мм, до 150 кВт). На вітчизняних підприємствах експлуатуються моделі провідних світових виробників: серії Unimat, Hydromat, Profimat (Weinig, Німеччина), QMB (Quality Greation Maker, Китай), RMM (Reignmac, Китай) та інші [1].

До брускових столярних деталей, що виготовляються на цих верстатах, висуваються високі вимоги: точність оброблення за 11–13 квалітетами, а допустимі відхилення розмірів становлять $\pm 0,2$ мм при попередній калібрації заготовок і $\pm 0,1$ мм при фінішній обробці [1, 4]. Забезпечення такої точності є складним завданням, оскільки налаштування верстата є трудомістким процесом - необхідно встановити у правильне положення велику кількість взаємозалежних елементів: чотирьох і більше шпинделів, притискних, подавальних і напрямних пристроїв. Точність оброблення досягається лише за умови, що заготовка не зміщується ні за висотою, ні за шириною під час

проходження через верстат. Це вимагає достатньо жорсткої станини, точного встановлення напрямних лінійок, мінімального биття шпинделів (радіальне биття ножів не повинно перевищувати 0,03 мм, торцеве - 0,04 мм), збалансування різального інструмента із залишковим дисбалансом не більше 30–50 г·мм та правильного налаштування подавальних вальців [4].

Як показали останні дослідження [3], усі традиційні поздовжньо-фрезерні верстати належать до «прохідного» типу з рухомою системою базування - заготовка протягується через робочу зону за допомогою рифлених роликів. Такий принцип роботи спричиняє низку негативних явищ: деформування заготовок невеликої жорсткості під час притискання, проковзування у вальцях та пошкодження поверхні. Аналіз похибок оброблення показав, що рухома система базування є домінуючим чинником впливу на точність і вносить до 60 % сумарної похибки фрезерування. При цьому експериментальні дослідження восьми чотирибічних верстатів, що експлуатуються на вітчизняних підприємствах від 5 до 18 років, виявили, що при критичному зношуванні ножів ($\rho = 45\text{--}50$ мкм) фактичні похибки за товщиною деталей перевищують допустимі значення до 3,7 раза, а найбільші похибки спостерігаються на верстатах китайського виробництва (QMB 620 GH, RMM 623) [1].

Для усунення вказаних недоліків у роботі [3] запропоновано принципово нову конструкційну схему - заміну вальцевої подачі позиційним базуванням заготовок на подавальній каретці. Реалізована за цим принципом конструкція чотирибічного поздовжньо-фрезерного верстата С20ПК цикло-прохідного типу забезпечує точність оброблення профільованого бруса розміром $4000 \times 200 \times 200$ мм у межах $\pm 0,07\text{--}0,34$ мм, тобто на рівні чинних стандартів ($\pm 0,1$ мм для фінішної обробки), а також дає змогу обслуговувати верстат одним робітником. Регресійна модель залежності точності оброблення від швидкості подавання та товщини шару, що знімається, дозволяє встановлювати раціональні режими фрезування.

Окремим аспектом конструкційного забезпечення точності є вібраційні характеристики верстата. Чисельні дослідження динаміки чотирибічного поздовжньо-фрезерного верстата [5] показали, що власні частоти траверси подачі у вертикальному напрямку становлять 88, 151, 680 і 786 Гц, тоді як частота обертання шпинделя сягає 96 Гц. Близькість цих значень свідчить про недостатню жорсткість траверси подачі і ризик резонансу між обертовим валом фрези та траверсою, що безпосередньо знижує точність оброблення. Це підтверджує необхідність комплексного підходу до проектування верстатів - з одночасним урахуванням статичної жорсткості, вібростійкості та конструкції системи базування.

Дослідження фактичної точності та динаміки її змін. Технологічна точність деревообробного верстата не є сталою величиною - вона має виражений динамічний характер. У роботі [11] процеси, що впливають на параметри верстата, класифіковано на три категорії: швидкоплинні (вібрації, коливання навантаження), середньої швидкості (розмірний знос різального інструменту, нерівномірний нагрів вузлів) та повільні (зношування напрямних, підшипників, що призводить до деградаційних явищ). Відповідно, на відмови точності за кожним параметром виробу впливають три категорії чинників: похибка початкової настройки, зсув фактичного рівня настройки в часі та розсіювання значень навколо цього рівня.

Експериментальні дослідження фактичної точності восьми чотирибічних поздовжньо-фрезерних верстатів, що експлуатуються в Україні від 5 до 18 років, дозволили побудувати регресійні рівняння залежності середнього значення розміру та поля розсіювання від часу роботи (циклу різання) у вигляді поліномів третього порядку [1]. Зокрема, для верстатів Weinig (Unimat 23, Unimat 500, Hydromat 1000, Hydromat 2000) поле розсіювання за товщиною становить $\pm 0,14\text{--}0,19$ мм, що відповідає 11–12 квалітетам точності, тоді як для китайських аналогів QMB 620 GH і RMM 623 — $\pm 0,23\text{--}0,37$ мм (13–14 квалітети). Перевірка гіпотез про закон розподілу похибок показала, що нормальний закон (закон Гауса) не описує отримані дані; натомість точність опису забезпечує закон Вейбулла.

Закономірність зміни технологічної точності упродовж міжремонтного періоду роботи описано в роботі [2] у вигляді поліноміальної залежності, що дозволяє визначати час і кількість необхідних регулювань верстата. На основі статистичного моделювання (програма «ModDynToch») встановлено, що для забезпечення працездатного стану упродовж міжремонтного періоду кожен верстат потребує трьох регулювань із визначеним інтервалом. Період роботи до першої параметричної відмови суттєво залежить від типу обладнання: для стрічковопилкових верстатів він становить близько 190 год, для круглопилкових - 480 год, для фрезерних - 840 год. Кореляція результатів моделювання з експлуатаційними даними сягає 7 %, що підтверджує адекватність розробленої моделі.

Однією з основних причин втрати точності є затуплення різального інструменту. Процес затуплення ножів фрез не є лінійним - він чітко поділяється на три стадії (рис. 1): I - припрацювання (характеризується швидкою зміною радіуса заокруглення різальної кромки ρ від початкового значення ρ_0 до точки А); II - поступове затуплення (плавне зростання ρ до точки В, на цій стадії інструмент експлуатується найдовший час); III - критичне (аварійне) затуплення (від точки В до руйнування кромки) [1].

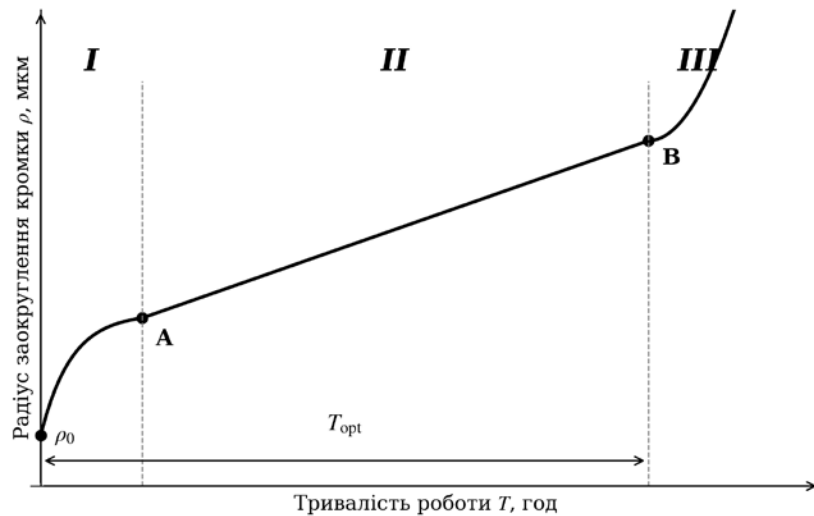


Рис. 1. Характер затуплення різальної кромки леза фрези під час експлуатації (адаптовано за [1]): I - припрацювання; II - стабільне затуплення; III - катастрофічне затуплення; ρ_0 - початковий радіус заокруглення кромки; $T_{\text{опт}}$ - оптимальний період стійкості інструменту

Основним детермінантом точності оброблення на поздовжньо-фрезерних верстатах є фактичне положення площини різання, що проходить через центр кола, вписаного в різальну кромку ножа. Під час фрезерування ножі поступово затуплюються, радіус вписаного кола збільшується, його центр зміщується по бісектрисі кута заточування, внаслідок чого оброблювана поверхня зміщується на величину d , яка визначається з виразу [1]:

$$d = (d_{\text{max}} - e_0 \cdot \rho_{\text{max}}) - (d_0 - e_0 \cdot \rho_0), \quad (1)$$

де ρ_0 - радіус заокруглення різальної кромки початково заточеного інструменту; ρ_{max} - радіус заокруглення на момент критичного затуплення; e_0 - відносна залишкова деформація під різальною поверхнею деревини; d_0 і d_{max} - відповідні розміри обробленої деталі.

Перевищення оптимального періоду стійкості проти спрацювання різальної кромки веде до зростання шорсткості обробленої поверхні, збільшення необхідної потужності різання та виникнення вимушених вібрацій [6, 7]. Експериментально встановлено, що при критичному зношуванні ($\rho \geq 50$ мкм) машинна точність MDF-фрезерування може погіршуватися з IT12 до IT17 - це підтверджує необхідність контролю стану інструменту [21, 22].

Другою важливою причиною фактичної похибки є вимушені вібрації, спричинені дисбалансом різального інструменту. Дослідження [8, 25] із застосуванням механіко-математичної моделі деревообробного шипорізного верстата у вигляді системи трьох пружно зв'язаних твердих тіл показали, що дисбаланс різального інструмента 0,020 кг·м генерує просторові вібрації не лише шпинделя, а й усього корпусу верстата, особливо в резонансних зонах. У роботі [9] методом моделювання крутильних коливань встановлено, що знос пасової передачі та ротора електродвигуна також спричиняє вимушені крутильні вібрації, які знижують якість обробленої поверхні.

Математичне моделювання технологічної точності. Якщо експериментальне дослідження дозволяє констатувати поточний стан верстата, то математичне моделювання дає змогу прогнозувати втрату точності в часі та обґрунтовано планувати міжналадні й міжремонтні роботи. Цей напрям об'єднує кілька принципово різних підходів - статистичні моделі розподілу похибок, моделі параметричної надійності та просторові моделі жорсткості пружної системи верстата.

Класичне припущення про нормальний закон розподілу похибок оброблення (закон Гаусса) було спростовано результатами експериментальних досліджень. У роботі [12] перевірено гіпотези про відповідність розподілу похибок різним теоретичним законам на восьми верстатах різного типу

(стрічковопилкові SKTP505-2 і LT-20; круглопилкові Barakuda-2, UN-500, TsDK4-2, VK-40; фрезерні SR6-9 і S-20) із застосуванням критерію χ^2 . Встановлено, що найбільш адекватним для опису ймовірності розподілу похибок оброблення деревини є закон Вейбулла, функція щільності якого має вигляд:

$$f(x) = \frac{b \cdot x^{b-1}}{a^b} \cdot \exp \left[-\left(\frac{x-x_0}{a} \right)^b \right], \quad (2)$$

де a - параметр масштабу, що корелює з полем розсіювання похибок; b - параметр форми, який визначає характер розподілу.

Для досліджених верстатів параметр форми знаходиться в межах $b = 1,89-3,11$, а параметр масштабу $a = 0,72-2,55$. Криві щільності розподілу для характерних значень параметра форми наведено на рис. 2. Для круглопилкових і поздовжньо-фрезерних верстатів зі значеннями $b = 2,96-3,11$ розподіл наближається до нормального ($b = 3,3$), тоді як для стрічковопилкових верстатів ($b = 1,89-2,21$) - до розподілу Релея ($b = 2,1$), а криві розподілу стають більш гострими та асиметричними. Поле розсіювання змінюється в межах $\omega = 0,92-5,00$ мм. На основі встановлених закономірностей розроблено алгоритм статистичного моделювання похибок методом Монте-Карло та реалізовано його у вигляді програми «ModToch» в середовищі MS Excel.

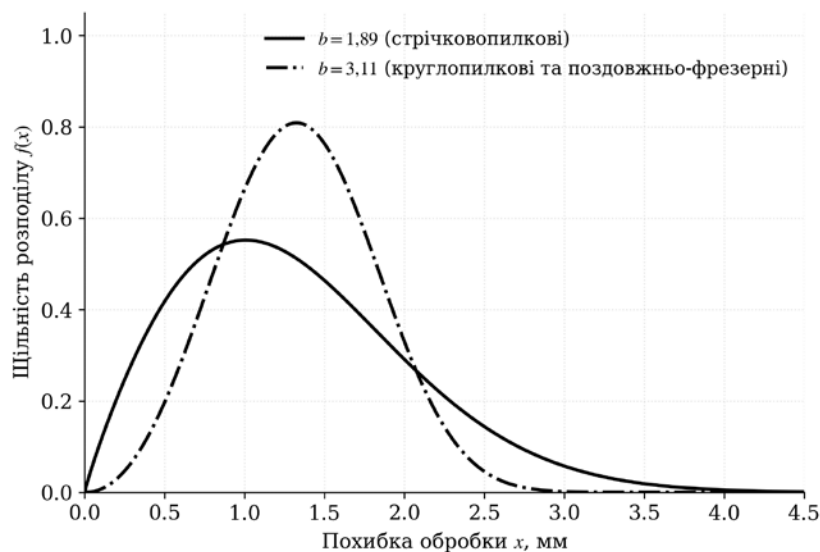


Рис. 2. Криві щільності закону Вейбулла для характерних значень параметра форми b : 1,89 - для стрічковопилкових верстатів; 3,11 - для круглопилкових та поздовжньо-фрезерних верстатів (параметр масштабу $a = 1,5$)

Принципово інший підхід реалізовано в роботі [13], де змодельовано параметричні відмови верстатів за критерієм технологічної точності на основі усіченого нормального розподілу (α -розподілу) швидкості розрегулювання. Параметр α розподілу характеризує середню швидкість розрегулювання верстата, а параметр β має розмірність часу і є запасом відносної довговічності за критерієм точності. На основі цієї моделі визначено періоди роботи різних типів верстатів до першої параметричної відмови: для стрічковопилкового SKTP505-2 - $\beta = 920-450$ год, для круглопилкового Barakuda-2 - $\beta = 2200-600$ год, для фугувально-рейсмусового AD741 - $\beta = 8200-4100$ год, для чотирибічного Unimat-17A - $\beta = 4000-2000$ год.

У дослідженні [14] цей підхід розвинуто далі: на основі припущення про лінійну залежність між швидкістю зношування елементів верстата і втратою технологічної точності виведено лінійне диференціальне рівняння зміни розміру заготовки, яке аналітично розв'язано методом Бернуллі. Отримана залежність дозволяє визначати тривалість послідовних інтервалів напрацювання між регулюваннями (Δt_1 , Δt_2 , Δt_3), причому ці інтервали поступово скорочуються в міру наближення до капітального ремонту. Для верстата Unimat-17A розраховано: $\Delta t_1 = 871$ год, $\Delta t_2 = 448$ год, $\Delta t_3 = 220$ год; імовірності безвідмовної роботи на цих інтервалах істотно залежать від параметра β і для $\beta = 4000$ год становлять відповідно 0,995, 0,854 і 0,876. Зменшення відносної довговічності (характерне для верстатів зі строком експлуатації понад 10 років) може знизити показник надійності стрічковопилкових верстатів у міжремонтному періоді до 35 %.

Окремим потужним підходом до моделювання є тензорно-геометричний опис просторової жорсткості верстата, розвинутий у роботі [15]. За цим підходом пружна система верстата подається через взаємодію двох підсистем - «інструмент» та «деталь», для кожної з яких будується

тривимірний еліпсоїд жорсткості (або податливості). Центри еліпсоїдів збігаються в зоні різання, а під дією сили різання вони зміщуються один відносно одного. Саме вектор цього відносного зміщення безпосередньо формує похибку обробки - огранку, овальність, хвилястість. Запропонований алгоритм знаходження результуючої поверхні податливості у вигляді 3D-поверхні дає змогу визначити жорсткість у будь-якому напрямку робочого простору верстата та ще на етапі проектування передбачити найбільш вразливі до навантажень напрямки.

Поряд із загальними підходами для конкретних типів верстатів розроблено спеціалізовані математичні моделі. Так, у роботі [16] на основі енергетичного методу, методів аналітичної механіки та методу скінченних елементів побудовано математичну модель точності пиляння деревини на горизонтальних стрічкопилкових верстатах, яка дозволяє визначати величину хвилястості пропилю, встановлювати раціональні режими різання та автоматизувати регулювання режимів. Реалізація таких імітаційних моделей у вигляді прикладного програмного забезпечення - «StatToch» і «ModToch» [12] для статистичного аналізу та моделювання розподілу похибок, «ModDynToch» [2] для моделювання динаміки технологічної точності упродовж міжремонтного періоду - є практичним інструментом для:

- визначення величини поля розсіювання похибок;
- встановлення закономірностей зміни точності упродовж міжремонтного циклу;
- прогнозування часу та необхідної кількості регулювань;
- аналізу впливу окремих чинників (швидкості подавання, глибини різання, жорсткості вузлів) на кінцеву точність оброблення за допомогою регресійних рівнянь.

Системи автоматичного контролю розмірів у процесі обробки. Оскільки повністю виключити вплив затуплення різального інструменту, температурних та пружних деформацій технологічної системи фізично неможливо, найбільш перспективним напрямком забезпечення стабільної фактичної точності є контроль розміру деталі безпосередньо в зоні обробки або одразу за нею. У роботі [17] узагальнено три основні класи таких систем - прилади активного контролю, системи автоматичного підналагодження та адаптивне керування пружними переміщеннями.

Прилади активного контролю забезпечують вимірювання розміру оброблюваної деталі в режимі реального часу. У зоні обробки або одразу після неї встановлюється вимірювальний пристрій - скоба активного контролю, лазерний або індуктивний датчик, який безперервно зчитує фактичний розмір деталі. Коли система фіксує наближення розміру до межі допуску, прилад автоматично подає сигнал системі ЧПК, яка коригує положення шпинделя, швидкість різання чи подачі. Найширше такі прилади застосовуються у шліфувальних і хонінгувальних верстатах, де відбувається інтенсивний знос інструменту [17]. Адаптивні системи керування дозволяють у процесі обробки змінювати режими різання залежно від заздалегідь обраного критерію точності, забезпечуючи постійність пружних переміщень технологічної системи за рахунок розмірного підналаштування або автоматичної зміни швидкості різання, величини подачі та геометрії різального інструменту.

Для деревообробних поздовжньо-фрезерних верстатів розроблено спеціалізовану інформаційно-комп'ютерну систему контролю, яка одночасно відстежує декілька параметрів динамічного стану [18]. Дослідження показали, що найважливішими інформативними показниками є рівень вібрації, навантаження приводів фрези та механізму подачі (контролюється через струм статора), температура обмоток двигуна та шорсткість обробленої поверхні. Завдяки комплексу вимірювальних пристроїв - лазерних профілометрів, датчиків вібрації та температури - система в режимі реального часу послідовно опитує ці параметри й порівнює їх з гранично допустимими значеннями. У разі перевищення норм система автоматично коригує швидкість подачі, змінює висоту розташування фрез або зупиняє верстат. Це дозволяє не лише забезпечити необхідну точність обробки, а й заздалегідь передбачити появу бракованих виробів, запобігти перевантаженню електродвигунів та вчасно виявити розбалансування механічних вузлів.

Серія праць японських дослідників започаткувала розвиток адаптивних систем для CNC-роутерів: у роботі [19] розроблено систему автоматичного вимірювання профілю різальної кромки прямих фрез змінного типу за допомогою лазерного вимірювального пристрою без зупинки верстата; у роботі [20] на основі цієї вимірювальної системи створено адаптивну систему контролю пазового фрезерування з трьома схемами оброблення, які поєднують зустрічне та попутне фрезерування і дозволяють компенсувати зменшення діаметра фрези у міру її затуплення. Аналогічні дослідження для MDF-фрезерування на стандартному CNC-роутері виконано у роботі [21], де встановлено, що значне затуплення інструменту може знижувати точність обробки з IT12 до IT17, причому реальні похибки різання не пропорційні зменшенню діаметра фрези - отже,

моніторинг лише стану інструменту є недостатнім. На основі цього висновку в роботі [22] розроблено адаптивну систему керування з машинним зором, яка вимірює саме розмір заготовки і автоматично коригує програму ЧПК; впровадження такої системи дозволило підвищити довгострокову точність обробки з IT16 до IT12.

Найновіший і найбільш перспективний напрям - це використання технологій Інтернету речей (IoT) та методів машинного навчання для прогностичного обслуговування (Predictive Maintenance). У систематичному огляді [23] на основі аналізу 44 первинних досліджень узагальнено застосування методів машинного навчання для діагностики та прогнозування механічних відмов у промислових умовах. Найчастіше застосовуються штучні нейронні мережі (27 % досліджень), методи дерев рішень, зокрема випадковий ліс (25 %), гібридні моделі (18 %) та моделі з прихованими змінними (14 %). Алгоритми випадкового лісу демонструють здатність передбачати поломки вузлів із точністю понад 99 % за хвилини або навіть дні до їх настання. Згорткові нейронні мережі (CNN) та рекурентні мережі з довгою короткостроковою пам'яттю (LSTM-автоенкодер), треновані на даних із датчиків вібрації, температури та струму, дозволяють створити динамічний «індекс здоров'я» верстата, який автоматично розрізняє «хороший», «проміжний» та «поганий» стан обладнання, адаптуючись до мінливих умов роботи. Концептуальним розвитком цього напрямку є запропонована в роботі [24] узагальнена модель Machine Tool Ability Status - інтегрованого показника, що поєднує точність, продуктивність, функціональність та доступність верстата. На відміну від традиційних підходів, які оцінюють лише точність вироблених деталей, ця модель дозволяє характеризувати стан верстата на рівні компонентів і підсистем упродовж усього життєвого циклу, що формує концептуальну основу для нового покоління деревообробного обладнання Industry 4.0.

Висновки. У даній роботі систематизовано та проаналізовано сучасні методи дослідження технологічної точності деревообробних верстатів. На основі огляду понад 20 наукових публікацій провідних вітчизняних і зарубіжних дослідницьких шкіл виокремлено чотири основні напрями досліджень, у межах яких сформовано такі узагальнення.

1. Конструкційне забезпечення технологічної точності деревообробних верстатів вимагає комплексного підходу до проектування - одночасного врахування жорсткості станини, точності встановлення напрямних, мінімального биття шпинделів, балансування різального інструмента та вібростійкості подавальної системи. Встановлено, що домінуючим чинником впливу на точність чотирибічних поздовжньо-фрезерних верстатів є рухома система базування «прохідного» типу, яка вносить до 60 % сумарної похибки; заміна її позиційним базуванням на подавальній каретці (верстат C20ПК) дозволяє досягти точності $\pm 0,07-0,34$ мм на рівні чинних стандартів.

2. Експериментальні дослідження фактичної точності восьми чотирибічних верстатів європейського та китайського виробництва, що експлуатуються в Україні від 5 до 18 років, показали, що при критичному затупленні ножів фактичні похибки за товщиною деталей перевищують допустимі значення до 3,7 раза. Основними причинами втрати точності є затуплення різального інструменту та вимушені просторові вібрації, спричинені дисбалансом різального інструмента.

3. Найбільш адекватний опис розподілу похибок оброблення на деревообробних верстатах забезпечує закон Вейбулла з параметром форми $b = 1,89-3,11$. Розроблені на цій основі імітаційні моделі та програмне забезпечення («ModToch», «ModDynToch», «StatToch») дозволяють прогнозувати кількість і час необхідних регулювань верстата. Тензорно-геометричне моделювання просторової жорсткості у вигляді еліпсоїдів податливості підсистем «інструмент» та «деталь» дає змогу ще на етапі проектування передбачити вразливі напрями пружної системи. Підхід на основі α -розподілу часу напрацювання та підходу Бернуллі дозволяє аналітично визначати послідовні інтервали між параметричними відмовами та ймовірності безвідмовної роботи верстата.

4. Найбільш перспективним напрямом забезпечення фактичної точності є автоматичний контроль розмірів безпосередньо в процесі обробки. Доведено, що для адекватної реакції на прогресуюче зношування інструменту необхідно вимірювати саме заготовку, а не сам інструмент; впровадження адаптивних систем із машинним зором дозволяє підвищити точність MDF-фрезерування з IT16 до IT12. Інтеграція ЧПК-систем із технологіями Інтернету речей та алгоритмами машинного навчання (Random Forest, CNN, LSTM-автоенкодер) забезпечує прогностичне обслуговування верстатів із точністю прогнозування понад 99 %.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні методики експериментального та математичного дослідження технологічної точності чотирибічних

поздовжньо-фрезерних верстатів із позиційним базуванням заготовок та системи автоматичного контролю розмірів на основі методів машинного навчання.

Список використаних джерел:

1. Mayevskyy, V., Pylypchuk, M., Taras, V., Burdiak, M., & Kopynets, Z. (2023). Patterns of changes in technological accuracy of plano-milling machines during the period of the cutting tool wear resistance. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 65(1), 5–22. DOI: <https://ojs.tuzvo.sk/index.php/AFXZ/article/view/46>
2. Pylypchuk, M., Taras, V., Burdyak, M., & Zhmudyyk, V. (2021). Patterns of change in technological accuracy of woodworking machines during overhaul period. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 47, 47-57. DOI: <https://doi.org/10.36930/42214707>
3. Pylypchuk, M., Burdiak, M., Taras, V., & Konchanskyy, A. (2022). Improving the design of the locating system of peripheral-milling machines. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 48, 4-12. DOI: <https://doi.org/10.36930/42214801>
4. Градиський, Ю. О., Соседко, М. О., & Войтов, А. В. (2023). Чотирибічні поздовжньо-фрезувальні верстати. DOI: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/34833>
5. Zhang, S. Q., Hua, J., & Xu, W. (2011). Study on Dynamic Characteristics and Dynamic Response of Woodworking Four-Side Planer. *Advanced Materials Research*, 291–294, 1970–1976. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.291-294.1970>
6. Djurković, M., Milosavljević, M., Mihailović, V., & Danon, G. (2019). Tool wear impacts on cutting power and surface quality in peripheral wood milling. *Wood Design and Technology*, 8, 9-17. URL: http://www.fdtme.ukim.edu.mk/en/wood_journal/archive/vol_8_no1/vol_8_no1_fulltext_2.pdf
7. Chladil, J., Sedlák, J., Rybářová, E. Š., Kučera, M., & Dado, M. (2019). Cutting conditions and tool wear when machining wood-based materials. *BioResources*, 14(2), 3495-3505. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.3495-3505>
8. Vukov, G., Slavov, V., Vichev, P., & Gochev, Z. (2021). Forced spatial vibrations of a wood shaper caused by the wear of the cutting tool. *Innovation in Woodworking Industry and Engineering design*, 10(2). DOI: <https://doi.org/10.66211/inno.2021.2.344>
9. Gochev, Z., & Vukov, G. (2017). Influence of the wearing of the saw unit elements of the wood shaper on the system vibration. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 59(2), 147-153.
10. Derbaba, V., Nosachov, V., & Rizo, Z. (2021). Research and improvement of methods of testing machines for geometric and kinematic accuracy. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 64, 198-212. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.198>
11. Bendikiene, R., & Keturakis, G. (2017). The influence of technical characteristics of wood milling tools on its wear performance. *Journal of Wood Science*, 63(6), 606-614. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-017-1656-x>
12. Pylypchuk M. I., Dziuba L. F., Mayevskyy V. O., Kopynets Z. P., Taras V. I. (2023). The distribution pattern of machining errors on woodworking machine tools. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 10(2), pp. A34–A42. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).a5](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).a5)
13. Pylypchuk, M., Dziuba, L., Rebezniuk, I., Chmyr, O., & Burdiak, M. (2021, September). Modeling parametric failures of woodworking machines according to the technological precision criterion. In *Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes* (pp. 119-126). Cham: Springer International Publishing. URL: <https://sci.lidubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/9914>
14. Dziuba, L. F., Pylypchuk, M. I., Chmyr, O. Y., & Pavliuk, R. V. (2025). Model of parametric reliability of woodworking machine tools. DOI: <https://jes.sumdu.edu.ua/model-of-parametric-reliability-of-woodworking-machine-tools>
15. Струтинський, В. Б., Чуприна, В. М., & Юрчишин, О. Я. (2015). Підвищення точності металорізальних верстатів на основі чисельних розрахунків еліпсоїдів жорсткості. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Технології в машинобудуванні*, (40), 78-84. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/20206>
16. Pylypchuk, M. I., Shostak, V. V., Stepanchuk, S. P., Rebezniuk, I. T., Lazarchuk, K., Salovskyy, S., & Salun, M. (2018). Mathematical model of wood sawing accuracy on horizontal band saw machines. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry*, 44, 5-14. DOI: <https://doi.org/10.36930/42184401>
17. Скларов, Р. А., & Приходай, Д. А. (2021). Шляхи підвищення точності обробки на металорізальних верстатах. *Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 1, 56-56.

18. Руденко, Т. Г., & Єрмолаєв, Ю. О. (2014). Інформаційно-комп'ютерна система контролю процесу фрезерування деревообробного верстата. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, (27), 228-234. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpkntu_2014_27_36
19. Ohuchi, T., Murase, Y. Milling of wood and wood-based materials with a computerized numerically controlled router IV: development of automatic measurement system for cutting edge profile of throw-away type straight bit. J Wood Sci 51, 278–281 (2005). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-004-0663-x>
20. Ohuchi, T., & Murase, Y. (2006). Milling of wood and wood-based materials with a computerized numerically controlled router V: development of adaptive control grooving system corresponding to progression of tool wear. Journal of Wood Science, 52(5), 395-400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0779-7>
21. Laszewicz, K., Górski, J., Wilkowski, J., & Czarniak, P. (2013). Analysis of dimensional accuracy of MDF milling process. Wood Research, 58(3), 451-464. URL: <http://www.woodresearch.sk/wr/201303/12.pdf>
22. Laszewicz, K., Górski, J., & Wilkowski, J. (2013). Long-term accuracy of MDF milling process—Development of adaptive control system corresponding to progression of tool wear. European Journal of Wood and Wood Products, 71(3), 383-385. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0679-2>
23. Fernandes, M., Corchado, J. M., & Marreiros, G. (2022). Machine learning techniques applied to mechanical fault diagnosis and fault prognosis in the context of real industrial manufacturing use-cases: a systematic literature review. Applied Intelligence, 52(12), 14246-14280. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10489-022-03344-3>
24. Sadasivam, L., Archenti, A., & Sandberg, U. (2018). Machine tool ability representation: A review. Journal of Machine Engineering, 18, 5-16.
25. Vukov, G., Gochev, Z., Slavov, V., Vichev, P., & Atanasov, V. (2017). Numerical investigations of the forced spatial vibrations of a wood shaper and its spindle, caused by unbalance of the cutting tool. PRO LIGNO, 13(4), 154–161. URL: https://www.proligno.ro/en/articles/2017/4/VUKOV_2.pdf

Рецензент: Поберейко Богдан Петрович, доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Дата надходження статті до видання: 24.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення 28.05.2026