

Я.А. Степчин [0000-0001-8912-8446], С.І. Радкевич [0000-0002-8791-1653],
В.В. Отаманський [0000-0002-5654-9049]

Державний університет «Житомирська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПУ ПРОЄКТУВАННЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Розвиток верстатобудування на основі використання новітніх технологій, обладнання, методів організації виробництва є визначальною умовою зростання промислового виробництва. Постійні та жорсткі вимоги до підвищення продуктивності та якості виготовлення деталей машин та конструкцій вимагає удосконалення методів створення нових зразків верстатів з метою мінімізації часу на їх проєктування та виготовлення, а також витрат ресурсів.

Застосування агрегатно-модульного принципу дозволяє створити технологічне обладнання в найкоротший термін з відносно обмеженого комплексу уніфікованих вузлів в умовах сучасного автоматизованого виробництва.

У роботі виконано аналіз умов застосування модульного принципу створення нового верстата з ЧПК, обмежень та специфічних особливостей його використання. Систематизовано конструктивні вузли верстатів спроєктованих за модульним принципом та умови застосування уніфікованих модулів.

Розглянуто загальні принципи розробки компонок металорізальних верстатів з ЧПК за модульним принципом та запропоновано уточнений, алгоритм формування конструкції нового верстата.

Ключові слова: верстат з ЧПК; модуль; компоновка; алгоритм.

Y.A. Stepchyn, S.I. Radkevych, V.V. Otamanskyi

APPLICATION OF THE MODULAR DESIGN PRINCIPLE FOR CNC MACHINE TOOLS

The development of the machine tool industry, driven by the implementation of cutting-edge technologies, equipment, and production management methods, is a crucial factor for industrial growth. Continuous and stringent requirements for higher productivity and quality in the manufacturing of machine parts and structures necessitate the improvement of methods for developing new machine tool models. The objective is to minimize design and manufacturing time while optimizing resource consumption.

The application of the aggregate-modular principle enables the rapid creation of manufacturing equipment from a relatively limited set of unified units within the framework of modern automated production.

This study analyzes the conditions, limitations, and specific features of applying the modular principle to the creation of new CNC machine tools. The structural units of machines designed using the modular approach are systematized, alongside the conditions for implementing unified modules. Furthermore, the general principles of modular configuration for metal-cutting CNC machine tools are examined, and a refined algorithm for the design synthesis of new machine tools is proposed.

Keywords: CNC machine tool; module; configuration; algorithm.

Постановка проблеми. Постійне зростання темпів розробки та вдосконалення конструкцій обладнання, що використовується у промисловому виробництві потребує постійного оновлення парку верстатів для обробки різанням різноманітних конструкційних та будівельних матеріалів: металів та сплавів, дерева, композитних матеріалів, каменю тощо. Розвиток конструкцій верстатів спрямовано на інтенсифікацію виробництва – забезпечення високої продуктивності й економічності роботи в межах постійно зростаючих вимог з екології та охорони довкілля [1]: обробка різанням з «надвисокими швидкостями», променем лазера, без використання технологічних засобів, виключенням шліфування тощо. Підвищення ефективності та надійності нових верстатів досягається раціональним спрощенням конструкції: скороченням кінематичних ланцюгів, полегшенням налагодження та ремонту, а також оснащенням верстата системами спостереження, діагностування та моніторингу його працездатності.

Постійні та жорсткі вимоги до підвищення продуктивності й якості виготовлення деталей машин та конструкцій вимагає удосконалення методів створення нових зразків верстатів з метою мінімізації часу на їх проєктування та виготовлення, а також витрат ресурсів. Одним з ефективних шляхів цього процесу є впровадження заходів з уніфікації, що дозволяє підвищити серійність виробництва, знизити собівартість, спростити ремонт та взаємозамінність виробів. Результатом руху у цьому напрямку є застосування агрегатно-модульного принципу, який є одним з ефективних напрямів структурно-функціональної оптимізації технічних об'єктів та дозволяє створити технологічне обладнання в найкоротший термін з відносно обмеженого комплексу уніфікованих вузлів в умовах сучасного автоматизованого виробництва.

Проєктування з застосуванням модульного принципу дозволяє створювати нове високопродуктивне обладнання для забезпечення виконання оптимального технологічного процесу

обробки спираючись на існуючий набір типових модулів – «цеглинок» майбутньої конструкції верстата [2 - 4].

Загалом агрегатно-модульна система формується з двох підсистем: набору агрегатних вузлів-модулів та низки конструкцій технологічного обладнання, отриманих шляхом комбінацій агрегатованих вузлів.

Провідні світові виробники різноманітного технологічного обладнання широко використовують модульний принцип його створення [2 - 10], як найбільш перспективний, проте при розробці верстатів він має певні специфічні особливості, що вимагають уточнення при створенні діючого алгоритму проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальні тренди у розвитку верстатобудування базуються на загальносвітових тенденціях сучасного промислового виробництва, розвитку науки й техніки та нових рішеннях у конструюванні.

Уніфікація вимог до конструкцій окремих вузлів і верстатів загалом базується на [1, 2, 4]:

- поширенні простих «типових оптимальних» схем компонування з короткими кінематичними ланцюгами (збільшення жорсткості конструкції та підвищення точності обробки різанням);

- масовому поширенні у виробництво верстатів з ЧПК (більше 90% серійних верстатів світових виробників оснащуються системами ЧПК);

- універсализації вимог по продуктивності та якості обробки, які усе більше залежать від кінцевих експлуатаційних вимог до деталей, вибраних конструкційних матеріалів, технології та інструментів і менше – від компонування верстата;

- одночасному підвищенні різноманітності та структуруванні класів функціонально та конструктивно закінчених вузлів (модулів), що випускаються, як провідними верстатобудівними концернами так і спеціалізованими компаніями.

При створенні металообробних верстатів з застосуванням модульного принципу використовується один з двох підходів [1, 4]:

1. Кожний виробник розробляє обмежений базовий набір модулів для певного типорозміру верстата, з використанням яких створюється низка модифікацій цього верстата, відповідних певним вимогам замовника.

2. Окремий виробник створює верстати різних компонувальних форм та модифікацій застосуванням існуючої номенклатури готових вузлів та механізмів, що розроблені і виготовлені спеціалізованими підприємствами.

Перший підхід більш характерний для потужних верстатобудівних компаній [5-9], що здатні самостійно виконувати розробку (і виготовлення) множин вузлів-модулів і закінчених компоновок верстатів. Другий – для менш потужних виробників [10], але його особливістю є більша гнучкість виробництва, швидша пристосованість до вимог замовника та зміни кон'юнктури, що базується на здатності використовувати значно ширшої номенклатури модулів.

Метою статті є удосконалення алгоритму створення раціональних конструкцій верстатів з ЧПК з застосуванням модульного принципу проектування.

Викладення основного матеріалу

Застосування модульного принципу проектування верстатів забезпечує:

- множину різноманітних компоновок і конструкцій верстатів застосуванням обмеженої номенклатури типів та поєднань модулів;

- вирішення певної технологічної задачі, коли проєктований верстат не наділяється надлишковими функціями, має простішу, дешевшу та ефективнішу конструкцію;

- мінімізацію витрат часу та ресурсів на проєктування нового верстата, тому що значну кількість вузлів (модулів) вже спроектовано;

- підвищення надійності нового верстата за рахунок застосування відпрацьованих конструкцій модулів, покращення умов його експлуатації та ремонтпридатність.

Створення нового верстата з ЧПК базується на певних положеннях, які встановлюють обмеження та визначають специфічні особливості використання модульного принципу проектування.

Усі конструктивні вузли такого верстата можна розділити на дві основні групи [2 - 4]:

1. Базові деталі та вузли («оригінальні»), конструкція яких визначається вибраною компоновкою верстата. Вони повинні мати уніфіковані приєднувальні поверхні, напрямні, інші типові елементи сформовані за принципом параметрично-розмірних рядів.

2. Набір готових модулів (уніфікованих вузлів та механізмів), що поділяються за технологічним призначенням, розмірами, потужністю, швидкохідністю, точністю тощо.

Застосовані у певній конструкції верстата уніфіковані модулі в свою чергу можна розділити на три підгрупи:

1.1. **Конструктивно обов'язкові** – конструкція та використання яких однозначно обумовлене рухами формоутворення, що повинен забезпечити проєктований верстат. Це приводи головного руху, рухів подач і позиціонування, вузли встановлення інструментів та заготівки. Наприклад – для фрезерного верстата з трьома керованими координатами – фрезерна голівка з механізмом встановлення інструмента, три модуля (механізма) подачі/позиціонування столу та/або шпинделя та власне стіл. Вони можуть відрізнятися розмірами, просторовим розміщенням, силовими характеристиками, діапазонами швидкостей, ходом, точністю, але їх використання однозначно обумовлене призначенням верстата.

2.2. **Конструктивно варіативні** – використання яких обов'язкове в кожному окремому компонуванні верстата, але конструкція кожного модуля може суттєво варіюватися в залежності від змісту та складності виконуваних верстатом задач. До них можна віднести:

- систему інструментозабезпечення (СІЗ), що може включати магазин (наприклад, на 20-100 позицій) та пристрій/ої заміни інструментів (одно або двопозиційний) в одному або кількох шпинделях;

- уніфіковані елементи систем, конструкція яких визначально залежить від компонування верстата –модулі та периферійні складові системи ЧПК, гідро та пневмосистем, систем змащення, охолодження, захисту тощо.

Вибір кінцевого варіанта СІЗ або іншої з названих систем буде залежати, в першу чергу, від запланованих для верстата задач, а не від його компонування.

2.3. **Конструктивно додаткові** – використання яких можливе в кожному окремому компонуванні верстата, але визначається певними специфічними умовами, наприклад: додатковими вимогами щодо безпеки персоналу, обробки шкідливих або пожежонебезпечних матеріалів, модулів, що розширюють функціональні можливості верстата тощо.

Можливе використання складових підгрупи 2.3 у загальній схемі створення верстата може бути враховане тільки надлишковими приєднувальними поверхнями на деталях та вузлах обох груп.

З аналізу виконаного у попередній роботі [3] слідує, що загальні тенденції до уніфікації інструменту, електронних систем та кінематичних структур верстатів з ЧПК забезпечують скорочення різноманітності методів формоутворення для обробки усіх форм та розмірів поверхонь деталей. Це мінімізує загальну кількість модулів для створення верстата будь-якого призначення.

На основі аналізу підходів до застосування модульного принципу створення металорізальних верстатів з ЧПК уточнено алгоритм [3] вибору необхідних елементів верстата з ЧПК та їх компонування в залежності від геометричних параметрів оброблюваної деталі (рис. 2) та очікуваних технологічних характеристик верстата: продуктивності, якості обробки, ступеню універсальності, гнучкості (рис 4).

Ілюстрацією до першої частини алгоритму є рис. 1 з зображеннями початкових компонувань токарного багатоцільового верстата з ЧПК за гілками алгоритму 1 – 3 для забезпечення необхідних рухів формоутворення.

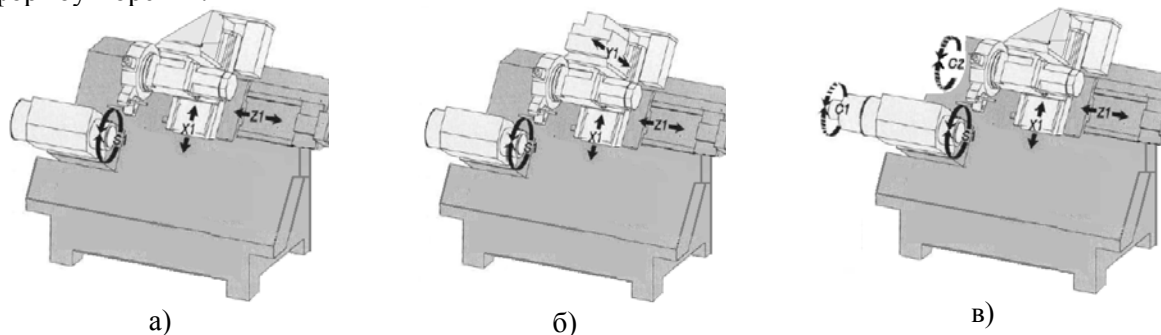


Рис. 1. Компонування токарного багатоцільового верстата з ЧПК за гілками алгоритму 1 – 3 (рис. 2): а – ГР: Оз, РПП: Пі₁, Пі₂, б – ГР: Оз РПП: Пі₁, Пі₂, Пі₃, в – ГР: Оз, Оі, РПП: Оз, Пі₁, Пі₂

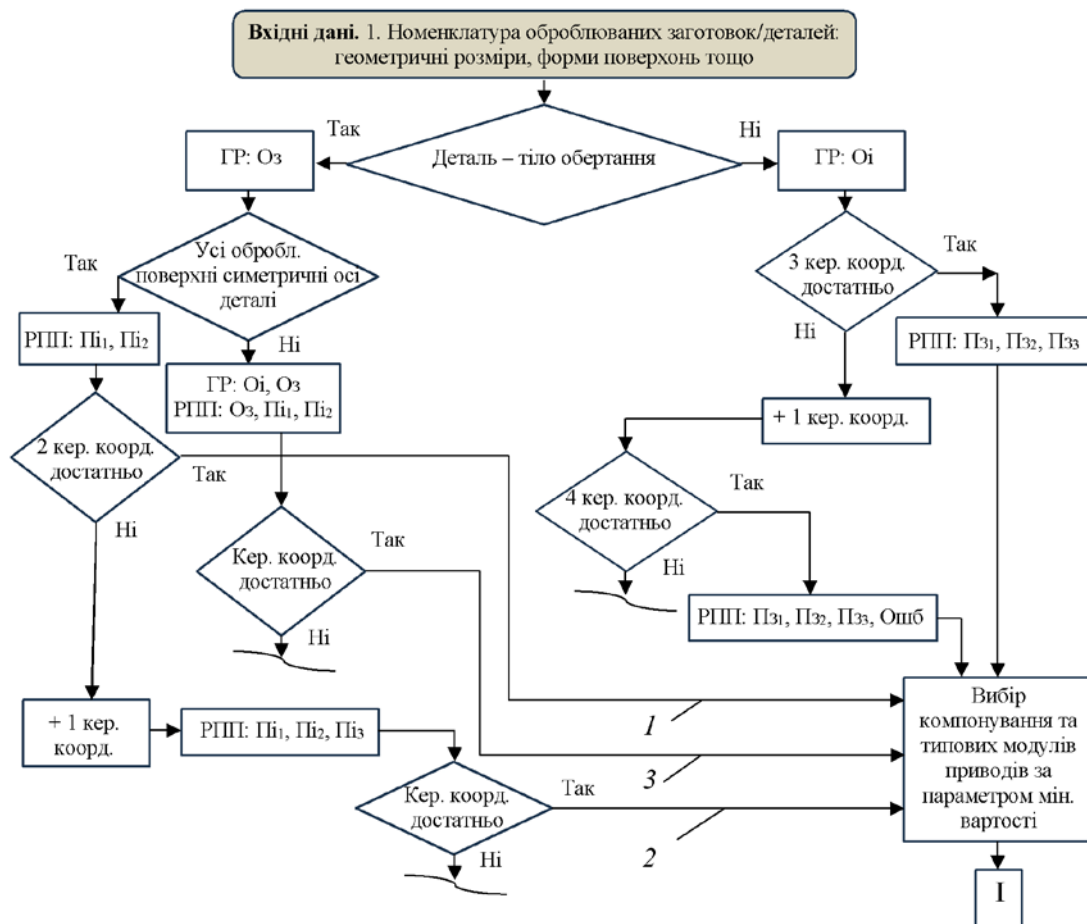
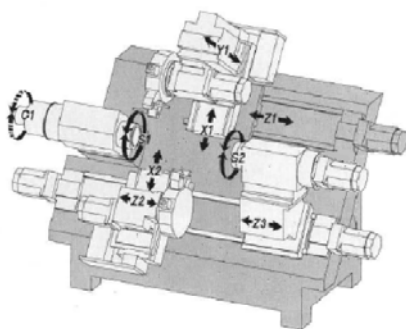


Рис. 2. Перша частина алгоритму формування компоновання металорізального верстата з ЧПК – в залежності від геометричних параметрів оброблюваної деталі

Другою частиною алгоритму виконується уточнення параметрів модулів формоутворення на основі вибору раціональних діапазонів параметрів режиму обробки різанням (швидкостей рухів, силових характеристик тощо), які визначають взаємопов'язані техніко-економічні параметри верстата – ефективність та продуктивність. Підвищення продуктивності (і ефективності) обробки у першому наближенні досягається збільшенням швидкостей робочих та холостих ходів виконавчих органів верстата з визначенням необхідної потужності приводів.

Також встановлюється необхідність введення у конструкцію додаткових модулів, що також можуть реалізувати підвищення продуктивності та розширення технологічних можливостей проєктованого верстата (рис. 3), зокрема, інтенсифікацією обробки за рахунок одночасної роботи кількох інструментів, застосуванням двох і більше шпинделів (для верстатів токарного виконання) тощо.

а)



б)

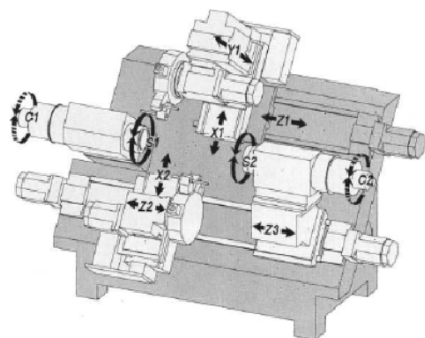


Рис. 3. Компоновання токарного багатоцільового верстата з ЧПК за гілками алгоритму 4, 5 (рис. 4): а: з додатковим супортом та задньою бабкою, б: додатково з протишпинделем

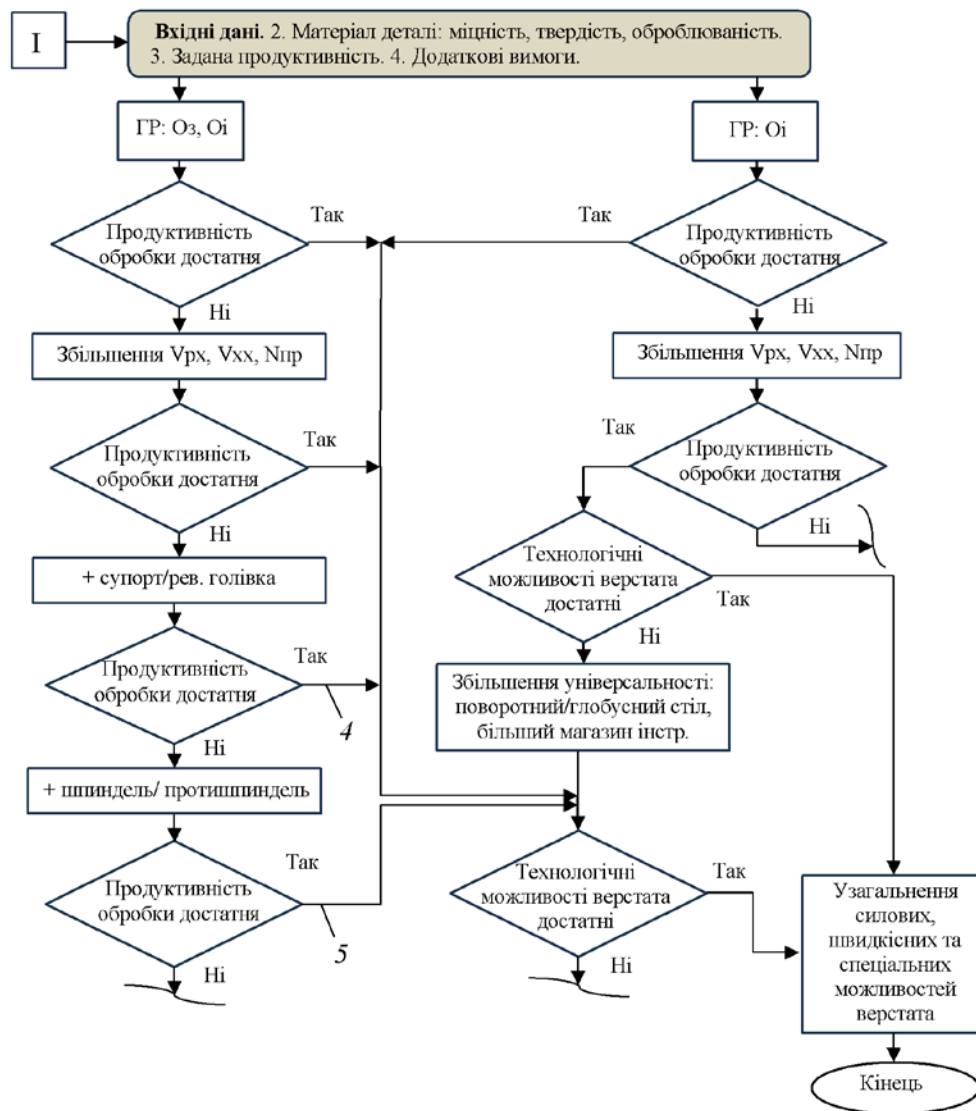


Рис. 4. Друга частина алгоритму вибору компоновання металорізального верстата з ЧПК – в залежності від характеристик оброблюваного матеріалу, заданої продуктивності та додаткових вимог

Запропонований уточнений, відносно попередньої роботи [3], алгоритм (рис. 2 та 4) формування конструкції нового верстата має окремі обмеження та спрощення:

1. Важливі у загальному переліку вхідних вимог, вимоги до точності обробки на верстаті, не розглядаються у алгоритмі. Зазвичай, окремі параметри точності закладені у заявлені технологічні характеристики кожного модуля, що реалізує рух формоутворення, але забезпечення необхідного рівня точності обробки залежить від множини додаткових факторів: точності виготовлення та жорсткості «оригінальних» вузлів та деталей верстата, стиків, їх кількості, оснащення та інструментів тощо. Тому параметр точності проєктованого верстата, у першому наближенні, можна встановити, як похідну від точності множини використаних у ньому модулів формоутворення.

2. Представлені у алгоритмі окремі цикли добору обмежені одною ітерацією з метою спрощення наведеної схеми. Кожне наступне розгалуження схеми збільшує складність та можливу різноманітність компоновання й результат у підсумку залежить від номенклатури та характеристик існуючих компоновальних модулів.

3. Також в алгоритмі не враховані специфічні вимоги до конструкції верстата та можливі додаткові обмеження тому фінальне компоновання верстата може мати певні конструктивні особливості.

4. Суттєве значення має виконання проєктованого верстата, зокрема загальне компоновання токарного багатоцільового верстата має більш уніфіковану конструкцію (рис. 3) ніж верстата для обробки корпусних деталей [2, 3].

Відповідно, спираючись тільки на вхідні дані першої частини алгоритму (рис. 2) – розміри деталей та необхідні рухи формоутворення для їх виготовлення, можна отримати низку прийнятних

варіантів компонувань багатоцільових верстатів з горизонтальним або вертикальним положенням шпинделя, рухами подач, які здійснює стіл, стіл та шпиндельна бабка тощо (рис. 5).

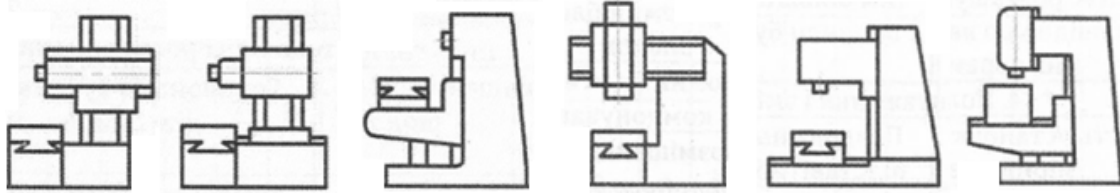


Рис. 5. Варіанти компонувань багатоцільових верстатів з горизонтальним або вертикальним положенням шпинделя з трьома рухами подачі (позиціонування) [2]

Висновки:

1. Основою до застосування модульного принципу проектування верстатів з ЧПК є швидкий розвиток уніфікованих мехатронних систем, максимальне спрощення механічної частини верстатів та уніфікація методів обробки й формоутворення для виготовлення усієї можливої номенклатури деталей.

2. Модульний принцип проектування верстатів забезпечує мінімізацію витрат часу та ресурсів на проектування нового верстата, підвищення його надійності, довговічності, покращує умови експлуатації та ремонтпридатність.

3. Представлений у роботі уточнений алгоритм визначення раціонального компонування металорізального верстата з ЧПК, залежно від основних визначальних характеристик оброблюваної деталі, дозволяє автоматизувати процес його розробки на основі модульного принципу проектування.

4. Визначальними факторами при практичному застосуванні алгоритму є наявний набір готових модулів (уніфікованих вузлів та механізмів), що обумовлюють розмірну та технологічну різноманітність проєктованих металорізальних верстатів з ЧПК.

Список використаних джерел:

1. Веселовська Н.Р. Аналіз сучасного стану верстатних комплексів механічної обробки в машинобудуванні / Н.Р. Веселовська // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Машинобудування. – 2012. – № 64. – С. 91-99.
2. Агрегатно-модульне технологічне обладнання : підручник, Ч.1 : Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання / В.А. Крижанівський, Ю.М. Кузнецов, А.М. Кириченко та ін. – Кіровоград, 2003. – 422 с.
3. Степчин Я.А., Отаманський В.В. Аналіз та вдосконалення алгоритмів модульного принципу створення металорізальних верстатів з ЧПК. Технічна інженерія, Державний університет «Житомирська політехніка». – 2020. №1 (85) – С. 23-29.
4. Пермяков А. А.; Ищенко М. Г. Элементная база создания станков и систем агрегатно-модульной конструкции. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Обладнання і технології сучасного машинобудування» присвяченої пам'яті заслуженого винахідника України академіка АН вищої школи України, д. т. н., професора Нагорняка С. Г., 2017, 25-26.
5. «HAAS». URL: <https://www.haascnc.com/> (дата звернення: 15.04.2026).
6. «Pfaffner». URL: <https://www.pfaffner.com/en/> (дата звернення: 15.04.2026).
7. «WINEMA». URL: <https://winema.de/> (дата звернення: 15.04.2026).
8. «SUGINO MACHINE LIMITED». URL: <https://www.sugino.com/en/> (дата звернення: 15.04.2026).
9. «ROMI SA». URL: <https://www.romi.com/en/productos/> (дата звернення: 15.04.2026).
10. «VECTOR». URL: <https://vector-cnc.com.ua/> (дата звернення: 15.04.2026).

Рецензент Громовий Олексій Андрійович, кандидат технічних наук, доцент, зав. каф. робототехніки, електроенергетики та автоматизації ім. проф. Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка».

Дата надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 24.05.2026

Дата оприлюднення 28.05.2026