

ЯКОВЕНКО І.Е., ПЕРМЯКОВ О.А., ДЕРГОУСОВ В.М., НАУМЕНКО О.А., ЯНГОЛЕНКО Я.А.

ДОСВІД СИНТЕЗУ БАГАТОІНСТРУМЕНТНИХ НАЛАДОК У ЗАСТОСУВАННІ ДО СУЧАСНИХ УМОВ

Проаналізовано тенденції випуску спеціального обладнання для масового виробництва та встановлено перспективи використання багатоінструментних блоків для такого обладнання. Розглянуто питання синтезу варіантів багатоінструментної обробки для деталей з великою кількістю сторін, що обробляються, і, відповідно, поверхонь обробки. Встановлено три групи факторів технологічного, геометричного та технічного характеру, які мають домінуючий вплив на сумісність обробки інструментами в одному інструментальному блоці. Встановлено їх допустимі значення та запропоновані матриці сумісності виконуваних технологічних операцій. На підставі проведених досліджень пропонується уточнення методика синтезу багатоінструментальних блоків спеціальних верстатів, компонування яких базується на максимальному використанні уніфікованих модулів та агрегатів. Даний підхід не залежить від виконуваних технологічних операцій та того, які саме модулі можуть бути використані для конструкторської реалізації запропонованого компонування інструментального блоку. Запропонована методика орієнтована на використання систем автоматизованого проектування в процесі створення верстатів з агрегатно-модульною компоновкою для масового виробництва заснована на широкому використанні бази знань технічних характеристик і технологічних можливостей модулів, що застосовуються, і дає можливість первинного налаштування системи синтезу під конкретні завдання, що вирішуються на підприємстві, шляхом встановлення допустимих граничних параметрів.

Ключові слова: механічна обробка, спеціальні верстати, інструментальний блок, синтез варіантів, агрегатно-модульний принцип, проектування.

YAKOVENKO I., PERMYAKOV O., DERGOUSOV V. NAUMENKO O., JANGOLENKO J. EXPERIENCE OF SYNTHESIS OF MULTITOOL SETTINGS IN APPLICATION TO MODERN CONDITIONS

The trends in the production of special equipment for mass production are analyzed and the prospects for the use of multi-tool blocks for such equipment are established. The questions of synthesis of variants of multi-tool machining for parts with a large number of machined sides and machining surfaces are considered. Three groups of factors of a technological, geometrical and technical nature are established, which have a dominant influence on the compatibility of machining with tools in one tool block. Their allowable values and the proposed matrix of compatibility of technological operations performed are established. Based on the research carried out, a refined method for the synthesis of multi-tool blocks of special machine tools is proposed, the layout of which is based on the maximum use of unified modules and assemblies. This approach does not depend on the technological operations performed and on which modules can be used for the design implementation of the proposed tool block layout. The proposed method is focused on the use of computer-aided design systems in the process of creating machine tools with an aggregate-modular layout for mass production. It is based on the wide use of the knowledge base of the technical characteristics and technological capabilities of the modules used and makes it possible to initially configure the synthesis system for specific tasks solved at the enterprise by establishing admissible boundary parameters.

Keywords: mechanical processing, special machines, tool block, synthesis of options, aggregate-modular principle, design.

Вступ. Сучасний розвиток економіки загалом і машинобудування, зокрема, ґрунтується на постійному зростанні вимог до дизайнерських, ергономічних, експлуатаційних характеристик на тлі постійного скорочення термінів експлуатації, в основному за рахунок морального старіння випущених моделей та появи на промисловому ринку нових конкурентних виробів. Цьому сприяє з одного боку бурхливий розвиток сучасних технологій у всіх галузях, а з іншого, все більш широке впровадження інформаційних технологій та штучного інтелекту у процес створення нових машин та виробів. Не можна не відзначити той факт, що всі компанії виробники товарної продукції прагнуть якнайшвидше досягти насичення ринку, поки конкуренти не вийшли на ринок з новими, прогресивнішими моделями виробів, тобто прогнозована тривалість життєвого циклу постійно скорочується.

Такий розвиток виробництва передбачає вирішення діалектичного протиріччя «продуктивність – технологічна гнучкість» у кожному конкретному випадку індивідуально. Цим пояснюється той факт, що поряд із постійним зростанням випуску універсального технологічного обладнання, яке базується в основному на принципах одноінструментної обробки та забезпечує високу гнучкість виробництва, досі випускається та широко використовується обладнання, що ґрунтується на принципах високої концентрації технологічного впливу, тобто багатоінструментної багатопозиційної обробки (хоча в значно менших обсягах і більш прогресивному компонуванні, ніж в епоху «автоматизації масового виробництва» у 70-80-ті роки минулого століття).

Мета дослідження. Встановлення та аналіз факторів, що мають домінуючий вплив на процес синтезу структур багатоінструментальних блоків технологічних систем з використанням сучасних досягнень компютерної мехатроніки та CALS-технологій, а також управління технологічними параметрами обробки у процесі проектування спеціальних верстатів, що ґрунтуються на принципах агрегування та модульного компонування.

Аналіз основних досягнень та літератури. Перехід від масового автоматизованого виробництва з широким використанням агрегатних верстатів та автоматичних ліній із жорстким зв'язком до більш сучасного гнучкого виробництва за рахунок технологічних систем, побудованих на основі універсальних та багатоцільових верстатів з ЧПУ, повністю не виключив інтерес машинобудівників до випуску агрегатних верстатів [1,2]. Інтерес до такого обладнання підкреслює той факт, що крім традиційних фірм, які мають досвід створення такого обладнання понад 40-50 років [3,4,5,6] на ринок виходять і молоді компанії, виробники технологічного обладнання даного типу для машинобудування (в основному для автомобільної, аерокосмічної, сантехнічної, фітінгової галузей виробництва) [7,8,9], які крім виробництва

металорізальних верстатів класичної одноінструментної обробки освоїли і випуск верстатів з високою концентрацією операцій за рахунок багатоінструментної обробки та позиційних транспортних систем [10,11]. Велика зацікавленість покупців такого обладнання пояснюється дуже високою продуктивністю пропонувананих систем (від 3 до 100 млн. сердечників циліндрів замків на рік, рис.1.) [6] та, незважаючи на високу вартість одиниці обладнання (більше 10000000 фунтів, рис.2.), високою економічною ефективністю (собівартість обробки однієї деталі знижується в 1,9 раза порівняно з варіантом обробки на багатоцільових верстатах з ЧПУ) [3].



Рис. 1 – Верстат багатоінструментної обробки Variomatic Т3і для обробки сердечника циліндра

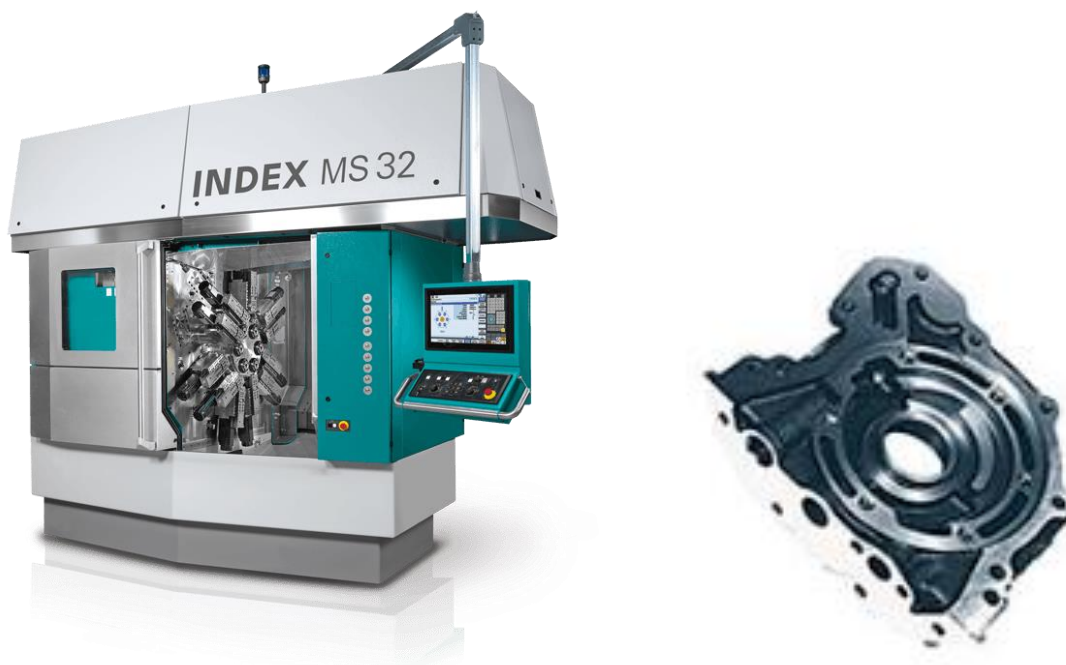


Рис. 2 – Багатошпиндельний токарний автомат INDEX MS32-6 фірми Kingsbury

Очевидно, що створення таких верстатів пов'язане не лише із забезпеченням високої продуктивності, а й гнучкості за рахунок використання сучасних досягнень мехатроніки та компонетики. Так, наприклад, всі верстати фірми Variomatic оснащені силовими модулями потужністю до 14 кВт і автономною системою керування, що в поєднанні з елементами механічної кулачкової системи керування поворотного столу дозволяє досить швидко і без особливих зусиль здійснити переналагодження обладнання на випуск іншої деталі даного типу [6]. Очевидно, що мехатронні модулі та мехатронні вузли є найбільш перспективною базою для створення щодо гнучкого прогресивного високопродуктивного технологічного обладнання, одним із розглянутих вище принципів побудови якого є автономність виготовлення, складання та

налагодження уніфікованих модулів і, зрештою, всього верстата, скомпанованого на їх базі. Зараз практично всі виробники використовують цю концепцію при створенні верстатів багатоінструментної обробки агрегатно-модульного компонування, що має ряд переваг, пов'язаних саме з розглянутою вище оптимізацією та відпрацюванням конструкцій силових модулів, скороченням термінів процесу проектування і виробництва та ін.

Організація багатоінструментної обробки передбачає вирішення конкретного технологічного завдання, тому проектування технологічного компонування є основою для подальшого проектування конструкторського компонування. Питанням проектування багатоінструментної обробки займалися багато вчених та наукових шкіл [12,13,14,15]. Так в роботі [12] розглядалися питання проектування багатоінструментної обробки переважно одного типу виконуваного технологічного переходу – токарного. При цьому розглядалися фактори, що впливають на можливість об'єднання інструменту в один інструментальний блок, що обмежуються як технологічними, так і геометричними параметрами процесу обробки. Однак питання, пов'язані з об'єднанням інструментів, що виконують технологічні переходи різних типів в одну інструментальну налагодження, не розглядалися. У роботі [13] були розглянуті питання проектування інструментальних налагоджень при обробці різноманітним осьовим ріжучим інструментом для агрегатних верстатів з жорстким кінематичним зв'язком, при цьому питання, пов'язані з можливістю зміни параметрів процесу різання та забезпечення гнучкості обладнання не були порушені. Також були детально розглянуті та згруповані фактори, що впливають на перспективність використання технологічного компонування інструментального блоку та багатопозиційного верстата в цілому, які, проте, розглядають лише загальні компоувальні моменти та не враховують геометричні параметри інструменту та процесу обробки, а як критеріальну оцінку пропонувалося використовувати мінімальну вартість силових агрегатів, здатних реалізувати запропоновані варіанти об'єднання інструментів у блоки. В роботах [14,15] даний підхід до процесу проектування було розширено з урахуванням можливості як структурної оптимізації багатоінструментної обробки, так й параметричної до конкретно обраної структури.

У загальному випадку основною особливістю багатоінструментної обробки є наявність руху заготовки або інструментального блоку з постійною швидкістю щодо інших елементів системи верстат-пристрій-заготовка-інструмент (ВПЗІ).

Таким чином, процес проектування технологічного компонування при багатоінструментній обробці може бути зведений до класичної оптимізаційної «задачі про найменше покриття (розбиття)» технологічних переходів, виконання яких необхідне і для забезпечення процесу обробки заготівлі при досягненні цілей оптимізації такого розбиття. Розробці алгоритму розв'язання задачі про найменше розбиття присвячено дуже багато робіт, від класичного розв'язання задач теорії графів [16] до побудови алгоритмів розв'язання конкретних прикладних задач [17,18,19].

Матеріали дослідження.

Концентрація операцій є одним з основних методів підвищення продуктивності у машинобудуванні. Особливо це характерно для обробки різних деталей, що мають кілька сторін обробки, кожна з яких містить кінцеву кількість однакових або різних співвісних поверхонь, які можуть бути оброблені або кінцевим різальним інструментом (найчастіше для корпусних деталей), або з використанням різців (тіа обертання), при цьому концентрація операцій при обробці площин здійснюється досить рідко. Тому при синтезі багатоінструментної обробки дуже важливо сформувані інструментальні блоки таким чином, щоб забезпечували мінімальну технологічну собівартість обробки при виконанні необхідної якості обробки поверхонь виробу. Це стосується як формування структури, і параметрів інструментальних блоків.

Задача синтезу інструментальних блоків може бути сформульована у наступному вигляді. Нехай у кожного об'єкта є множина сторін обробки $\vec{S} = \{1, \dots, k\}$, причому кожна містить підмножину осей обробки $\vec{O}_j = \{1, \dots, j\}$, $\vec{O}_j \in \vec{S}$, на яких розташовано підмножина оброблюваних поверхонь $\vec{P}_{ji} = \{1, \dots, i\}$, $\vec{P}_{ji} \in \vec{O}_j$, де кожен елемент системи, що аєалізується (сторона-вісь-поверхня), представлено у вигляді вектора, оскільки цей елемент має характерний набір параметрів (розташування поверхонь, вимоги до точності розмірів, форми та взаємного розташування поверхонь, параметри якості поверхні тощо). Для реалізації процесу обробки поверхні необхідно виконати набір операцій $\vec{T} = \{1, \dots, l\}$ (елементарних технологічних переходів, коли розглядається обробка елементарним різальним інструментом $\vec{E} = \{1, \dots, l\}$, який одночасно виконує тільки один технологічний перехід). Причому кожна з цих операцій характеризується певним набором параметрів, що відображають кінематику формоутворення, геометричні характеристики інструменту, параметри процесу різання та ін.

Тоді для здійснення процесу обробки необхідно сформувані сукупність множини компоувальних варіантів інструментальних блоків $\{\vec{N}_l\}, l \in L$, які можливо технічно реалізувати, та які відображені векторами проектних параметрів, таким чином, що $\cup_{l \in L} \vec{N}_l = \vec{E}$, (тобто, щоб виконувалася множина елементарних технологічних переходів, які відображені векторами $\vec{T} = \{1, \dots, l\}$ проектних параметрів, спрямованих на отримання параметрів об'єкта обробки \vec{P}_{ji}).

Загальна схема розв'язання задачі синтезу варіантів багатоінструментної обробки може бути представлена у вигляді графа (рис. 3).

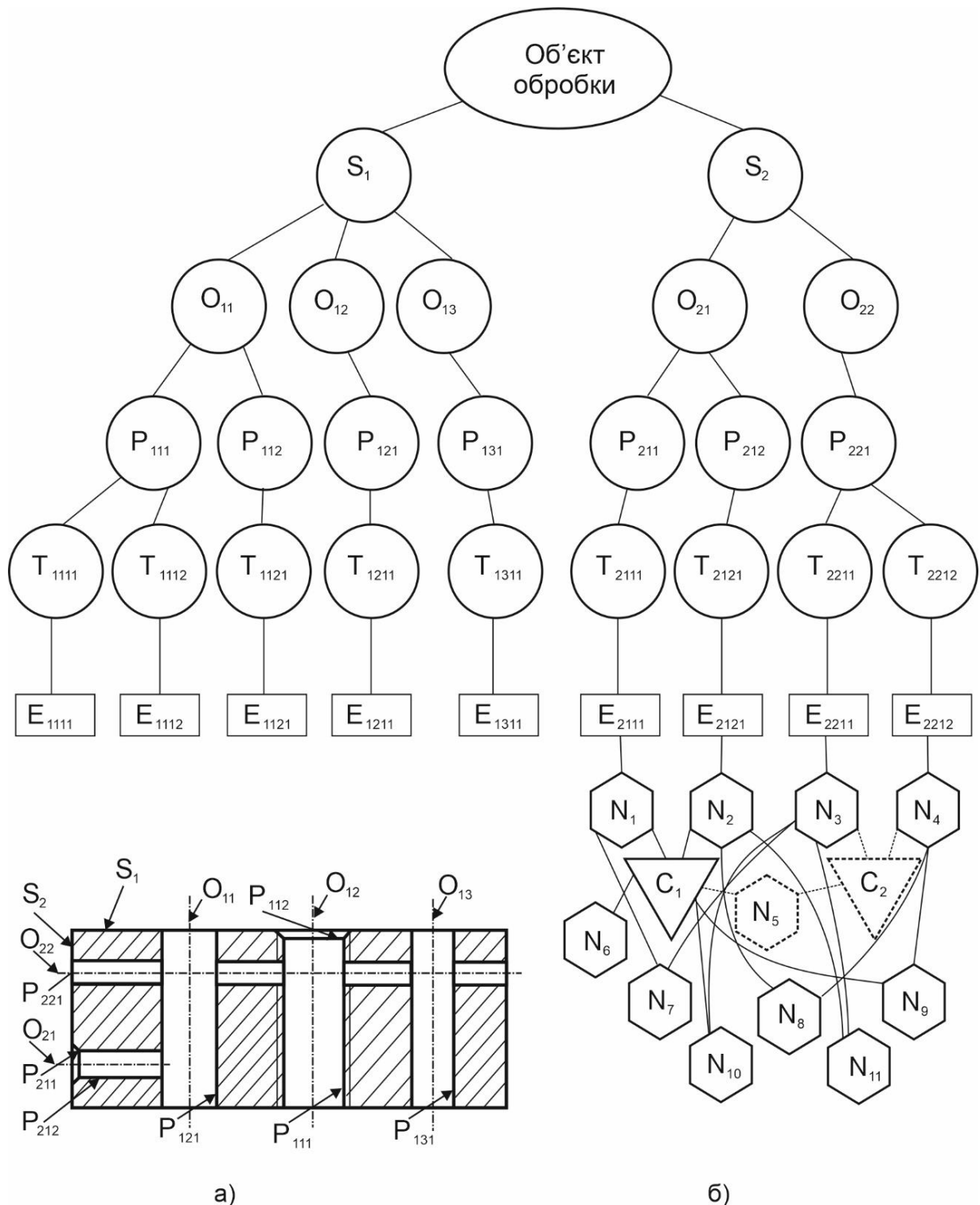


Рис. 3 – Приклад побудови графа формування варіантів багатоінструментальних налагоджень:
 а) – об'єкт обробки; б) – фрагмент графа

На малюнку 3 наведено приклад фрагмента побудови такого графа для уявної деталі, що містить дві сторони обробки, п'ять осей та сім різних поверхонь: фаски – P_{212} , P_{112} ; внутрішні циліндричні поверхні – P_{211} , P_{221} , P_{131} , P_{121} , (причому, досягнення шорсткості поверхні P_{221} можливе тільки за рахунок виконання двох переходів, свердління та розгортання – T_{2211} та T_{2212}); різьбова поверхня P_{111} . Для виконання обробки поверхонь P_{211} , P_{212} , P_{221} зі сторони S_2 достатньо виконання чотирьох технологічних операцій (свердління поверхонь P_{212} , P_{221} , зенкування поверхні P_{211} та розгортання поверхні P_{221}).

Вузли графа, відповідають: оброблюваним поверхням - \bigcirc ; елементарним різальним інструментам - \square ; комбінованого інструменту - ∇ ; інструментальним налагодженням (одне або багатоінструментним) - \hexagon . Штриховою лінією показаний варіант використання комбінованого інструменту типу свердло-розгортка, який теоретично можливий, але практична реалізація якого в даний час не застосовується на виробництві, тому у подальшому такі варіанти розглядати не має сенсу.

У формальній постановці завдання записується у вигляді:

$$\vec{N} = \{\vec{n}_l \mid \vec{n}_l = f(\vec{p}_{kjl}, \vec{t}_l, \vec{e}_l); \vec{e}_l \in \vec{E}; \vec{t}_l \in \vec{T}; F_n(U, W, V) = 1; \forall l \in L; k \in K; j \in J; i \in I\}$$

де \vec{N} – множина проектних параметрів інструментальних блоків; \vec{P}_j – множина векторів параметрів об'єкта обробки (поверхонь), що мають спільну сторону обробки j ; $\vec{t}_l \in \vec{T}$ – множина технологічних операцій (переходів), які необхідні для забезпечення обробки множини поверхонь; $\vec{e}_l \in \vec{E}$ – множина елементарних різальних інструментів, здатних виконати набір технологічних переходів \vec{T} ; $F_n(U, W, V)$ – система обмежень, що враховує геометричну, технологічну та технічну можливість формування множини інструментальних блоків. Очевидно, що для одношпindelної обробки вектор проектних параметрів елементарного різучого інструменту \vec{e}_l тотожний вектору проектних параметрів \vec{n}_l .

Умовою того, що різучі інструменти можуть входити в один і той же інструментальний блок, є приналежність співвісних поверхонь, що одержуються при обробці кожним інструментом (у тому числі комбінованим), однієї узагальненої сторони обробки, іншими словами дотримується можливість забезпечити формоутворення поверхонь за рахунок одного варіанту взаємного переміщення інструментів та заготовки. При формуванні інструментальних блоків обов'язково дотримання умови неперетину виконуваних елементарних переходів кожним із інструментів блоку (тобто розглянута вище класична задача про найменше розбиття).

Очевидно, що кількість варіантів багатоінструментних блоків, які здатні реалізувати наведений як приклад, досить простий випадок обробки, різко зростає зі збільшенням кількості співвісних поверхонь. Однак, кількість таких варіантів значно скорочується, якщо враховувати обмежуючі фактори, що впливають на можливість реалізації того чи іншого варіанта багатоінструментного блоку.

Об'єднання кількох інструментів у інструментальний блок можливе лише у разі виконання системи обмежень, які можна поділити на три основні групи: геометричні, технологічні та технічні. Організаційні обмеження у даному випадку не розглядаються (рис.4.).

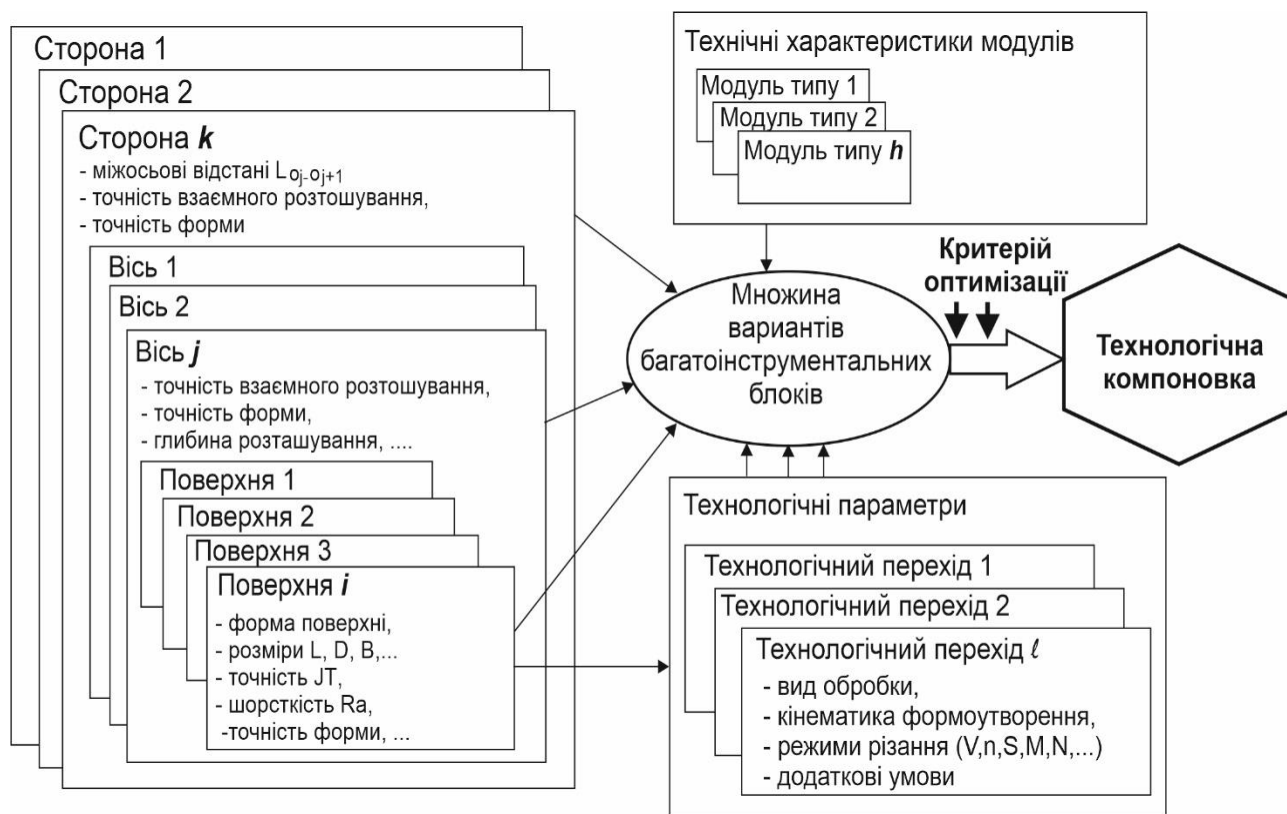


Рис. 4 – Чинники, що впливають на синтез варіантів багатоінструментної обробки

Для кожної групи обмежень необхідно виділити чинники, які визначають можливість об'єднання інструментів у блоки, та скласти для них матриці сумісності, де 1 - означає можливість об'єднання відповідних інструментів у блоці, 0 – відсутність такої можливості.

Розглянемо ці чинники докладніше.

Технологічні обмеження.

До технологічних обмежень відносяться фактори, які пов'язані, в першу чергу, безпосередньо з можливістю забезпечення кінематики формоутворення поверхні та вимог до шорсткості, розмірних параметрів і точності поверхні, що формується. Авторами було проведено аналіз теоретичної можливості виконання різних елементарних технологічних переходів загальним інструментальним блоком з урахуванням кінематики формоутворення, параметрів точності, що досягається в результаті обробки, енергетичними характеристиками процесу обробки та ін. Були також проаналізовані конструкції багатоінструментних налагодок провідних фірм виробників такого обладнання. На підставі цього аналізу була сформована матриця сумісності елементарних технологічних переходів при об'єднанні виконуючих їх елементарних ріжучих інструментів в інструментальний блок за умови належності поверхонь, що формуються, одній стороні обробки та з урахуванням різних варіантів організації обробки співвісних поверхонь: паралельної (найчастіше використовується), послідовної, паралельно-послідовної.

$$\varphi(\vec{t}_{j_i}, \vec{t}_m) = 1; \forall (\vec{t}_{j_i} \in \vec{T}_j; j_i \in J_k; m = j_i + 1; m \in J_k)\},$$

Фрагмент цієї матриці наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Сумісність технологічних операцій при об'єднанні елементарних різальних інструментів у блоки.

№пп	Технологічна операція	Свердління	Зенкерування	Зенкування	Цекування	Розгортання	Точіння	Розточування	...	Фрезерування
1	Свердління	1	1	1	1	1*	0	0	...	1**
2	Зенкерування	1	1	1	1	1*	0	0	...	0
3	Зенкування	1	1	1	1	0	0	0	...	0
4	Цекування	1	1	1	1	0	0	0	...	0
5	Розгортання	1*	1*	0	0	1	0	0	...	0
6	Точіння	0	0	0	0	0	1	0	...	0
7	Розточування	0	0	0	0	0	0	1	...	0
...
n	Фрезерування	1**	0	0	0	0	0	0	...	1***

Примітка: * – допускається поєднання у разі послідовної обробки; ** - допускається при формуванні комбінованого інструменту; *** - допускається при формуванні набору фрез.

Найбільш ефективним, з погляду кінематики руху інструментального блоку, є об'єднання у блок однотипних елементарних ріжучих інструментів. При об'єднанні різнотипних інструментів додатково розглядаються обмеження точності оброблюваних поверхонь. Значення максимальної та мінімальної точності (квалітетів) поверхонь, оброблюваних *j*-им інструментальним блоком, не повинні відрізнятися більш ніж на два-три квалітета при паралельній обробці.

$$\max\{JT_{j_i}\} - \min\{JT_{j_i}\} \leq [G_{JT}]; \forall (JT_{j_i} \in \vec{p}_{j_i}; \vec{t}_{j_i} \in \vec{T}_j; j_i \in J_k)$$

де, JT_{j_i} квалітет *j*-ої поверхні, що отримується в результаті виконання обробки, \vec{p}_{j_i} - вектор параметрів *j*-ої поверхні, $[G_{JT}]$ - допустиме значення різниці квалітетів при обробці в інструментальному блоці (може бути обрано під час налаштування автоматизованого синтезу інструментальних блоків).

Можливість забезпечення якості кожної поверхні, що формується інструментальним блоком, вже враховано у матриці сумісності технологічних операцій.

Геометричні обмеження.

Основним геометричним обмеженням є умова належності поверхонь, що формуються, до одної сторони обробки, тобто можливість забезпечити кінематику формоутворення при відносному переміщенні заготовки та інструментального блоку.

Необхідно враховувати ще два обмеження, які значно впливають на жорсткість інструментального блоку і, відповідно, на точність процесу обробки поверхні.

Обмеження з вильоту інструменту обумовлено необхідністю регулювання довжини вильоту шпинделя або патрона та інструменту у певному діапазоні, що пояснюється необхідністю забезпечення жорсткості інструментів блоку в процесі обробки.

$$\max\{L_{bji} + L_{ji}\} - \min\{L_{bji} + L_{ji}\} > [G_L]; \quad \forall (L_{bji} \in \overline{p_{ji}}; L_{ji} \in \overline{p_{ji}}; j_i \in J_k),$$

де - L_{bji} відстань від елемента на деталі, що заважає переміщенню інструментального блоку в осьовому напрямку до початку процесу різання поверхні, мм; L_{ji} - довжина ji -ої поверхні, мм; $[G_L]$ - допустимий перепад довжин вильоту інструменту для інструментального блоку, що розглядається, мм.

Розкид діаметрів інструментів, що входять до інструментального блоку, не повинен перевищувати допустимого значення:

$$\frac{\max\{D_{ji}\}}{\min\{D_{ji}\}} \leq [G_D]; \quad \forall (D_{ji} \in \overline{p_{ji}}; j_i \in J_k),$$

де D_{ji} - діаметр ji -ої поверхні, мм; $[G_D]$ - допустиме значення перепаду діаметрів оброблюваних поверхонь.

Технічні обмеження.

Технічні обмеження пов'язані з можливістю конструкторської реалізації варіанта технологічного компоновання інструментального блоку наявним набором модулів або конструкцією оригінального вузла. До цих обмежень можна віднести можливість перемикання режимів різання в процесі обробки (з використанням мехатронних модулів це обмеження втратило актуальність); можливість забезпечити подачу ЗОТР у зону обробки у процесі різання; конструктивні особливості вузла та ін.

Так при формуванні інструментального блоку обробки осьовим різальним інструментом як таке обмеження виступає мінімально допустима міжцентрова відстань між осями шпинделів, що пояснюється вимогою забезпечення нормальної установки підшипників шпинделя і залежить від типу, конструкції та розмірів багатошпиндельного блоку.

$$\{XY_{ji}\} - \{XY_m\} \geq [G_{XY}]; \quad \forall (XY_{ji} \in \overline{p_{ji}}; j_i \in J_k; m = j_i + 1; m \in J_k),$$

де XY_{ji} - координата розташування ji -ої поверхні для отворів або координата початку ji -ої поверхні для іншого типу поверхонь; $[G_{XY}]$ - мінімально допустима міжосьова відстань між шпинделями або положенням інструменту в інструментальному блоці, мм

Технічні обмеження багато чому визначаються сферою застосування спеціального устаткування, залежить від використовуваних під час виготовлення технологічних модулів, конструкцій інструменту, специфіки виробництва та т.д. Ця система обмежень повинна налаштовуватися під конкретного виробника і не розглядається в даній роботі.

Результати. На підставі проведених досліджень автори пропонують уточнену методику синтезу багатоінструментальних блоків спеціальних верстатів, компоновання яких базується на максимальному використанні уніфікованих модулів та агрегатів. Даний підхід не залежить від виконуваних технологічних операцій та того, які саме модулі можуть бути використані для конструкторської реалізації пропонованого компоновання інструментального блоку.

Ця методика передбачає виходячи з параметрів, формованих у процесі обробки поверхонь і виробі загалом, призначення варіантів елементарної технології обробки кожної поверхні. Створений масив технологічних операцій (елементарних переходів) є основою побудови графа варіантів багатоінструментальних блоків. Вибір технічно реалізованих варіантів здійснюється з використанням алгоритму розв'язання задачі про найменше розбиття з накладенням у вигляді матриць системи обмежень технологічного характеру, геометрії поверхонь, що обробляються, і об'єкта обробки в цілому, а також технічні обмеження, пов'язані з особливістю виробництва обладнання певного призначення.

Запропонована методика синтезу багатоінструментальних блоків орієнтована використання систем автоматизованого проектування в процесі створення верстатів з агрегатно-модульною компоновкою для масового виробництва. Методика заснована на широкому використанні бази знань технічних характеристик та технологічних можливостей модулів, що застосовуються. Пропонований авторами підхід дає можливість первинного налаштування системи синтезу варіантів під конкретні завдання, які вирішуються на підприємстві, шляхом встановлення допустимих граничних параметрів $[G_{XY}]$, $[G_D]$, $[G_L]$, $[G_{JT}]$ та ін. Також можна коригувати розроблені матриці систем обмежень на підставі відстеження характеристик випущеного обладнання в період його життєвого циклу, статистичних та лабораторних досліджень.

Запропонована методика дозволяє як критерій вибору найбільш перспективного варіанта структур багатоінструментальної обробки використовувати різні оцінки сформованих і технічно реалізованих варіантів (мінімальна кількість інструментальних блоків, задана кількість інструментальних блоків за кількістю позицій транспортного пристрою, рівномірність розподілу інструментів за різними блоками та ін.). У класичній постановці вирішується завдання про мінімальне розбиття з використанням мінімальної кількості інструментальних блоків. Однак вибір цільової функції може бути змінений на етапі налаштування системи.

Висновки. На підставі аналізу тенденцій випуску спеціального обладнання агрегатно-модульної конструкції та наявності постійного попиту такого обладнання для масового виробництва встановлено необхідність розвитку питань, пов'язаних із багатоінструментною обробкою на базі використання сучасних досягнень компютерної, мехатроніки та CALS-технологій.

На підставі аналізу існуючих конструкцій спеціальних верстатів агрегатно-модульної конструкції виділено та класифіковано три основні групи факторів, які мають домінуючий вплив на синтез структур інструментальних блоків: технологічні, геометричні та технічні. Встановлено математичні залежності та граничні значення факторів, що розглядаються, також розроблено матриці сумісності параметрів для кожного фактора з відповідної групи.

Проведені дослідження дозволили авторам запропонувати удосконалену та орієнтовану на автоматизоване проектування методику синтезу варіантів багатоінструментної обробки, що технічно реалізується, яка заснована на принципах теорії графів. У даній методиці синтез варіантів інструментальних блоків спирається на відомі алгоритми розв'язання задачі про найменше розбиття з урахуванням встановленої додаткової системи обмежень різного характеру, яка спирається групи факторів, що були досліджені авторами. Це дозволяє скоротити кількість варіантів технологічних компоновок інструментальних блоків, що проглядаються в процесі синтезу, та, відповідно, спростити час та сам процес проектування технологічної компоновки верстата.

Підтвердження. Загальний підхід та запропонована модель процесу синтезу багатоінструментних блоків використовувалася на Харківському машинобудівному заводі «Світло Шахтаря» української корпорації CORUM Group у процесі обробки корпусних деталей вугільних комбайнів.

Список літератури:

1. Market Report 2021. // German Machine Tool Builders Association (VDW), Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main. 2022. 84P.
2. Metal Cutting Machine Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Laser, Waterjet, Plasma, Flame), By Application (Automotive, Aerospace & Defense, Marine), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027
3. Каталог фірми Kingsbury. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://kingsburyuk.com/>
4. Каталог фірми Hydromat Inc., [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://hydromat.com/>
5. Каталог фірми Giuliani. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.giulianimachines.com/>
6. Каталог фірми Variomatic Werkzeugmaschinen GmbH. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.variomatic.de/>
7. Каталог фірми Turmatic Systems Inc. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.turmatic.com>
8. Каталог фірми K.R. Pfiffner GmbH. [Електронний ресурс] – Режим доступу <https://www.pfiffner.com/>
9. Каталог фірми PICCHI. [Електронний ресурс] <https://www.picchimachines.it/>
10. Каталог фірми TTM Makine San. [Електронний ресурс] <https://www.cnctransfer.com/>
11. Каталог фірми WE-FUN. [Електронний ресурс] <http://www.we-fun.com/>
12. Гильман А.М., Егоров Г.В., Егоров Ю.Б., Ясаков Ю.В. Автоматизированное проектирование оптимальных наладок металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1984. – 168с. ил. 2.
13. Яковенко И.Э., Яковенко Е.И. Синтез структур многоинструментальных блоков при обработке концевым инструментом. // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». - Харьков:НТУ «ХПИ». - 2010. - Вып.40. - С.90-93.
14. Structural Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools / Yakovenko I., Permyakov A., Prihodko O., Basova Y., Ivanova M. // In: Tonkonogiy V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 352-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_36
15. Parametric Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools. / Yakovenko I., Permyakov A., Naboka O., Prihodko O., Havryliuk Y. // In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 85-93 https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_9
16. КРИСТОФИДЕС Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М: Мир, 1978.
17. ЕРЕМЕЕВ А. В., ЗАОЗЕРСКАЯ Л. А., КОЛОКОЛОВ А. А. Задача о покрытии множества: сложность, алгоритмы, экспериментальные исследования//Дискретный анализ и исследование операций. Серия 2. 2000. Т. 7, № 2. С. 22-46.
18. Ferdous SM, Rahman MS (2015) An Integer Programming Formulation of the Minimum Common String Partition Problem. PLoS ONE 10(7): e0130266. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130266>
19. Bulteau L, Fertin G, Komusiewicz C, Rusu I. A Fixed-Parameter Algorithm for Minimum Common String Partition with Few Duplications. In: Darling A, Stoye J, editors. Algorithms in Bioinformatics. vol. 8126 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg; 2013. p. 244–258. Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40453-5_19.

Bibliography (transliterated):

1. Market Report 2021. // German Machine Tool Builders Association (VDW), Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main. 2022. 84P.
2. Metal Cutting Machine Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Laser, Waterjet, Plasma, Flame), By Application (Automotive, Aerospace & Defense, Marine), By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027
3. Kataloh firmy Kingsbury. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://kingsburyuk.com/>
4. Kataloh firmy Hydromat Inc., [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://hydromat.com/>
5. Kataloh firmy Giuliani. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://www.giulianimachines.com/>
6. Kataloh firmy Variomatic Werkzeugmaschinen GmbH. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://www.variomatic.de/>
7. Kataloh firmy Turmatic Systems Inc. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://www.turmatic.com>
8. Kataloh firmy K.R. Pfiffner GmbH. [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu <https://www.pfiffner.com/>
9. Kataloh firmy PICCHI. [Elektronnyy resurs] <https://www.picchimachines.it/>
10. Kataloh firmy TTM Makine San. [Elektronnyy resurs] <https://www.cnctransfer.com/>
11. Kataloh firmy WE-FUN. [Elektronnyy resurs] <http://www.we-fun.com/>
12. Hylman A.M., Ehorov H.V., Ehorov Yu.B., Yasakov Yu.V. Avtomatyzirovannoe proektyrovanye optymalnykh naladok metallorozhushchykh stankov. – М.: Mashynostroyeniye, 1984. – 168s. yl. 2.
13. Iakovenko Y.Э., Yakovenko E.Y. Syntez struktur mnohoynstrumentalnykh blokov pry obrabotke kontsevyym ynstrumentom. // Vestnyk natsyonalnoho tekhnicheskoho unyversyteta «Kharkovskyy polytekhnycheskyy ynstitut». - Kharkov:NTU «KhPY». - 2010. - Vыр.40. - S.90-93.

14. Structural Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools / Yakovenko I., Permyakov A., Prihodko O., Basova Y., Ivanova M. // In: Tonkonogiy V. et al. (eds) Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 352-363. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_36
15. Parametric Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools. / Yakovenko I., Permyakov A., Naboka O., Prihodko O., Havryliuk Y. // In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – pp. 85-93 https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_9
16. KRYSTOFYDES N. Teoriya hrafov. Alhorytmicheskyi podkhod. M: Myr, 1978.
17. EREMEEV A. V., ZAOZERSKAIa L. A., KOLOKOLOV A. A. Zadacha o pokrytyu mnozhestva: slozhnost, alhorytmy, eksperimentalnye yssledovaniya/Dyskretnyi analiz y yssledovaniye operatsyi. Seryia 2. 2000. T. 7, № 2. S. 22-46.
18. Ferdous SM, Rahman MS (2015) An Integer Programming Formulation of the Minimum Common String Partition Problem. PLoS ONE 10(7): e0130266. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130266>
19. Bulteau L, Fertin G, Komusiewicz C, Rusu I A Fixed-Parameter Algorithm for Minimum Common String Partition with Few Duplications. In: Darling A, Stoye J, editors. Algorithms in Bioinformatics. vol. 8126 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin Heidelberg; 2013. p. 244–258. Available from: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-40453-5_19.

Поступила (received) 16.01.2023

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Яковенко Ігор Едуардович (Yakovenko Ihor) - кандидат технічних наук, професор кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: igor.dych59@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8344-996X

Пермяков Олександр Анатолійович (Permyakov Oleksandr) - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: perm_a@i.ua, ORCID: 0000-0002-9589-0194

Дергусов Вадим Миколайович (Dergousov Vadim) - аспірант кафедри кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; генеральний директор АТ «Харківський машинобудівний завод „Світло Шахтаря“» тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: dergousov.vadim@corum.com, ORCID: 0000-0002-0199-6589

Науменко Олександр Артемович (Naumenko Oleksandr) – кандидат технічних наук, професор кафедри механічної та електричної інженерії Інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету, тел. (067 576 55 68); e-mail: ol.naumenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-9936-3922

Янголенко Ярослав Андрійович (Jangolenko Jaroslav) – здобувач освіти другого магістерського рівня за спеціальністю «Галузеве машинобудування» Інженерно-технологічного факультету Полтавського державного аграрного університету, тел. (099 0938864); e-mail: mech@pdaa.edu.ua