

**Володимир Кравець¹, Олександр Кравець², Сергій Лапковський³,
Володимир Фролов⁴, Максим Гладський⁵, Людмила Данилова⁶**

¹інженер кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: bond118@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858>. **ResearcherID:** [ITU-8413-2023](https://orcid.org/0009-0005-6867-4858)

²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: om.kravets@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956>. **ResearcherID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/0000-0002-7468-0956)

³кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **ResearcherID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)

⁴кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: y.k.frolov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)

⁵кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: gladsky@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>. **ResearcherID:** [Q-1624-2017](https://orcid.org/0000-0002-4547-7131)

⁶кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: ldanylova@outlook.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. **ResearcherID:** [ADU-9265-2022](https://orcid.org/0000-0002-4442-3959)

СИСТЕМНО-СТРУКТУРНИЙ АСПЕКТ ВИБОРУ ЕЛЕМЕНТІВ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Стаття присвячена вирішенню задач технологічного підготовки виробничого підприємства. Описані запропоновані методологічні основи формалізації процесу вибору структурних елементів роботизованих систем з урахуванням конкретних обмежень та виробничих умов. Запропонована методологія дає змогу в систематизованому вигляді охоплювати не тільки вже існуючі на виробництві технічні рішення, але й знайти такі, створення яких можливе, а, у певних випадках, навіть доцільне; знаходити існуючі технічні рішення, які вже реалізовані безпосередньо на виробництві або такі, що забезпечені технічною документацією, що буде сприяти мінімізації часу пошуку та оперативному вибору готових рішень.

Ключові слова: структурний елемент; вибір; технологічне підготовка; роботизоване виробництво; робототехнічна система; промисловий робот.

Рис.: 2. Бібл.: 28.

Актуальність теми дослідження. Для сучасного машинобудівного виробництва, яке є базою науково-технічного прогресу, характерне стрімке зростання обсягів продукції. Ця обставина являє собою наслідок значних темпів збільшення номенклатури виробів, її частотою змінюваністю та вдосконалення конструкцій виробів. Нині стан економічного та промислового розвитку країни насамперед визначається рівнем автоматизації виробництва, впровадженням у різні сфери промисловості промислових роботів (ПР) і робототехнічних систем (РС). Вирішувати найскладніші задачі, що стоять перед промисловістю, можливо лише за рахунок значного скорочення термінів технологічного підготовки виробничого підприємства (ТПРВ), впровадження сучасного технологічного обладнання, зокрема ПР і РС. Таким чином, дослідження в галузі проектування РС завжди будуть актуальними.

Постановка проблеми. Безсумнівно, що задачі створення РС не повинні розглядатися окремо від загальних концепцій розвитку та вдосконалення виробничих систем машинобудівного виробництва. Створення РС є дуже важливою, але тільки однією із ланок усієї множини робіт, що присвячені вдосконаленню та комплексній автоматизації в усіх галузях виробничої діяльності підприємств.

Багатогранність та складність проблем створення РС призводять до того, що технічне переоснащення машинобудівних підприємств на основі роботизації останніх сполучено з великими капітальними та трудовими витратами і призводить до того, що кардинального значення набуває ступінь підвищення якості, ступінь обґрунтованості та оптимальності проектних рішень, які забезпечують досягнення найвищих експлуатаційних і техніко-економічних показників функціонування РС. У зв'язку з цим ТПРВ повинно системно базуватися на єдиній науково-методологічній основі, що, по-перше, вимагає подальше поглиблення досліджень із технології машинобудування як наукового напрямку, а по-друге, поширення спектра робіт у галузі ТПРВ виробів. Вочевидь, у світлі нових технологічних і технічних можливостей необхідна принципово новий погляд на питання ТПРВ і проектування РС.

Зростання технічної оснащеності й технічна інтеграція виробничих процесів в умовах роботизації, що пов'язана з цим, накладає вагомий відбиток на критерії вибору окремих структурних елементів РС.

На відміну від створюваних традиційних виробничих систем, у яких основними структурними елементами, що реалізуються у відповідних конструкторсько-технологічних рішеннях, є верстатне обладнання (ВО), технологічна оснастка (ТО) та різальний інструмент (РІ), у РС спектр структурних елементів значно розширюється: РС, окрім зазначених вище складових, включає ПР, технічні засоби керування (ТЗК), транспортне обладнання (ТрО), технічні засоби зберігання (ТЗЗ) тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У результаті аналізу інформаційних джерел складається таке враження, що нині створення РС набуло статус повністю самостійної технологічної задачі, яка вирішується на базі використання найсучаснішого арсеналу обладнання та створення принципово нових програмних і технічних засобів. Саме з цієї причини в останні роки питанням вибору структурних елементів РС було присвячено досить багато публікацій та наукових досліджень як українських, так і зарубіжних авторів [1–28].

Що стосується українських авторів, то в роботах [1–3] наведено методологічні основи вибору ВО. Також у роботах [1; 2] наведені деякі рекомендації стосовно вибору РІ для ВО та деякі поради щодо вибору ТрО. У роботі [1] можна знайти деякі фрагменти методології вибору ПР, а у роботі [2] – деякі рекомендації стосовно вибору ТЗЗ. У роботі [4] наведено поради стосовно вибору ТО, а у роботі [5] – щодо вибору ТЗК.

Що стосується зарубіжних авторів, то в роботах [6–9] наведено рекомендації щодо вибору ВО, у роботах [10–13] – щодо вибору РІ, у роботах [14–16] – щодо вибору ПР, у роботах [17–19] – щодо вибору ТЗК, у роботах [20–22] – щодо вибору ТО, у роботах [23–25] – щодо вибору ТрО, у роботах [26–28] – щодо вибору ТЗЗ.

Ретельний аналіз вищенаведених літературних джерел дозволив дійти висновку, що в них питання вибору структурних елементів РС розглядалися лише у межах локальних підсистем РС, без урахування взаємозв'язків між цими підсистемами.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Цілком очевидно, що зараз методологія створення РС повинна виходити за рамки вирішення лише технічних проблем і повинна включати всебічне та глибоке пророблення технології, управління й організації, які є не тільки взаємозалежними із суміжними технічними проблемами, але й безпосередньо впливають на їх правильне вирішення. Аналіз останніх досліджень і публікацій, що були присвячені роботизації виробництва, дозволяють зробити висновок, що проблема вирішення задачі обґрунтованого вибору структурних елементів РС наразі не формалізована та не вирішена.

Метою статті є вирішення задачі вибору структурних елементів робототехнічних систем і формалізація такого процесу.

Виклад основного матеріалу. На рис. 1 наведено схему, що ілюструє збільшення кількості взаємозв'язків, які визначають вибір основних структурних елементів структури РС порівняно з традиційними виробничими системами, у яких проблеми вибору, головним чином, замикалися в межах локальних підсистем (на рис. 1 взаємозв'язки між ними показані подвійними лініями). Головне місце в цій схемі належить виробу (В), що виготовляється.

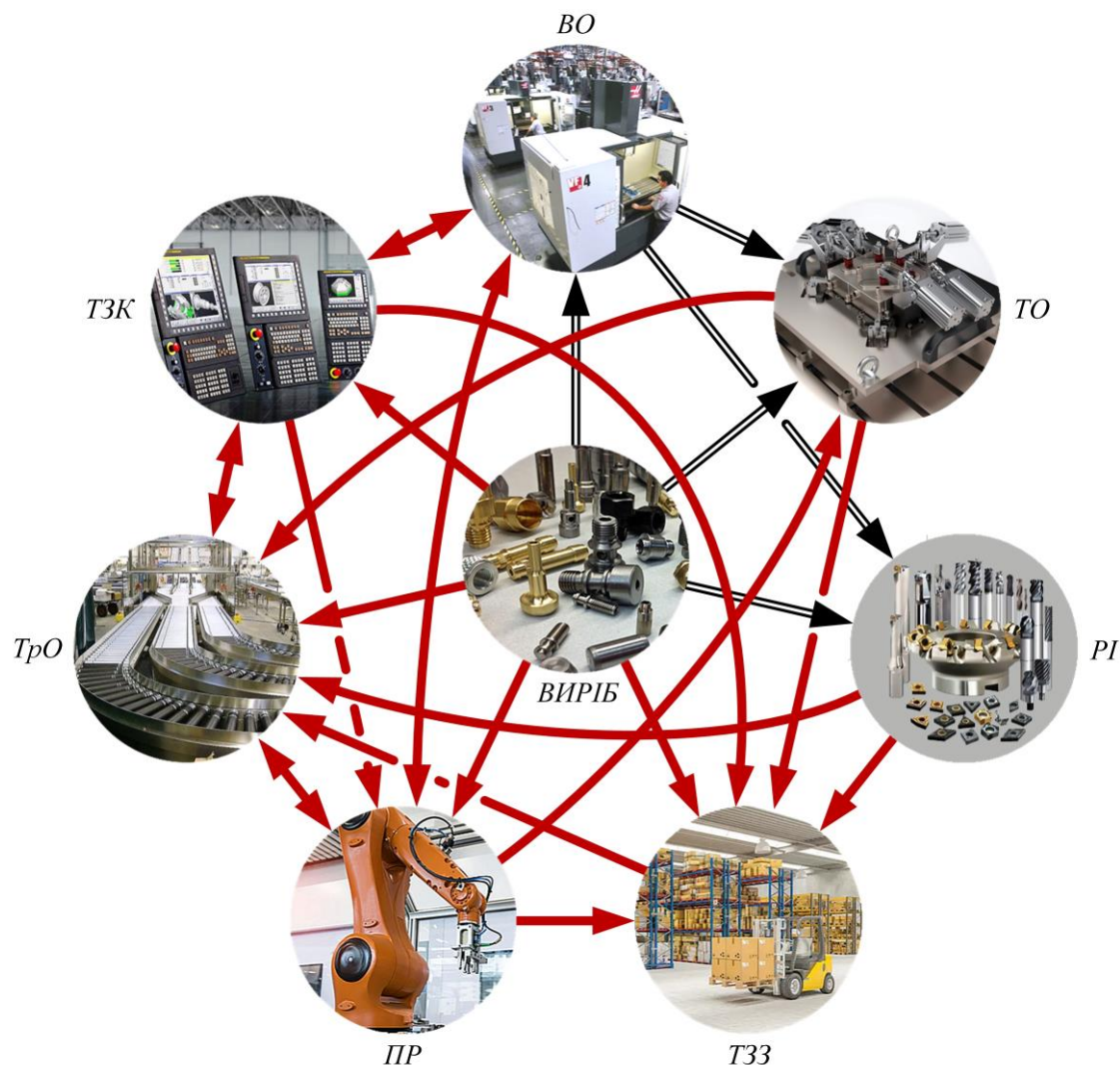


Рис. 1. Взаємозв'язки між основними структурними елементами РС

Джерело: розроблено авторами.

Задачі вибору технічних засобів оснащення процесів виробництва відіграють головну роль у системі технологічного підготовки виробництва і знайшли відбиття у групі відповідних стандартів єдиної системи технологічного підготовки виробництва, у якій викладені загальні правила, яких проектувальник неодмінно повинен дотримуватися при підготовленні виробництва.

Грунтуючись на стандартах вищезазначеної групи, а також використовуючи свої особові кваліфікацію та досвід, проектувальник обирає декілька різних варіантів технічних альтернатив елементів виробничої системи, здійснює їх аналіз, проводить техніко-економічне оцінювання та остаточно обирає найкращий варіант згідно з обраним критерієм.

Такий підхід має низку явних недоліків:

1) кількість варіантів альтернативних технічних рішень, що з'являється в полі зору розробника, безпосередньо залежить від його кваліфікації;

2) призначення великої кількості варіантів альтернативних технічних рішень і їх техніко-економічного аналіз суттєво збільшують трудомісткість усіх проєктних робіт, що дуже часто не відповідає нормативним термінами остаточного ухвалення рішення;

3) не має гарантії, що при евристичному виборі певної множини можливих альтернативних варіантів у поле зору проєктувальника потрапить саме оптимальний варіант технічного рішення задачі.

З метою запобігання вищезазначених недоліків пропонується декілька напрямів, відповідно до яких повинне здійснюватися вдосконалення методів вибору структурних елементів РС:

– розроблення методів, що забезпечать оперативність отримання та гарантовану повноту множини альтернативних варіантів рішень як об'єктів аналізу;

– розроблення системи проєктування, що забезпечить раціональну організацію та скорочення трудомісткості проєктного пророблення варіантів технічних рішень з урахуванням усієї багатогранності обумовлюючих зв'язків;

– розроблення критеріїв і методів оцінювання варіантів технічних рішень.

В основі загальних методологічних положень вибору структурних елементів РС, які будуть розглянуті нижче, лежить той факт, що для кожного з елементів, який наведено на рис. 1, можливе перебування в одному з трьох станів:

Стан O – це стан, при якому структурний елемент e , маючи певні параметри та характеристики, є основним обумовлюючим структурним елементом, тобто цей елемент зумовлює вибір іншого елемента:

$$e_i^O = (E)_i^O, \quad (1)$$

де $(E)_i^O$ – вектор значень параметрів, що характеризує елемент e_i^O .

Стан D – це стан, при якому структурний елемент e , маючи певні параметри та характеристики, є додатковим обумовлюючим структурним елементом, тобто цей елемент накладає додаткові обмеження або вимоги на вибір іншого елемента:

$$e_j^D = (E)_j^D, \quad (2)$$

де $(E)_j^D$ – вектор значень параметрів, що характеризує елемент e_j^D .

Стан III – це стан, при якому структурний елемент e є шуканим, тобто необхідне визначення вектора значень параметрів $(E)_k^{III}$ цього елемента.

Символом e позначено одиничний структурний елемент, однак дуже часто обмеження, умови або цілі вибору визначаються саме на множині елементів, іншими словами, має місце бути деякий узагальнений елемент E :

$$E_i = \bigcup_{r=1}^n e_{ir}, \quad (3)$$

де r – порядковий номер структурного елемента у множині E_i , $e_{ir} \in E_i$.

В усіх наведених вище записах i, j, k – це індекси, що відбивають вид розглянутого структурного елемента РС.

Грунтуючись на наведених поняттях і враховуючи прийняті позначення, згідно зі схемою, що наведена на рис. 1, можна записати:

$$e_{TO}^{III} \Leftarrow e_B^O \wedge e_{BO}^D \wedge e_{PP}^D, \quad (4)$$

тобто вибір верстатного пристрою визначається параметрами виробу як об'єкта виробництва з урахуванням вимог, що накладаються ВО та ПР, або

$$e_{ГО}^{III} \Leftarrow E_B^O \wedge e_{BO}^D \wedge e_{ПР}^D, \quad (5)$$

тобто вибір верстатного пристрою визначається параметрами деякої множини деталей E_B^O , яку планується обробляти на цьому верстатному пристрої з урахуванням усіх вимог, що накладаються ВО та ПР.

Дані формалізовані записи відображають факт здійснення вибору структурного елемента e_i^{III} , але не вказують на ступінь деталізації і конкретизації здійснення вибору в залежності від етапу та стадії ТПРВ, на якому він проводиться.

Очевидно, що процес вибору всіх основних структурних елементів здійснюється в кілька етапів, з поступовим підвищенням ступеня конкретизації визначення структурного елемента. Тоді, з урахуванням етапності такого вибору, формалізований запис матиме такий вигляд:

$$(e_{ГО}^{III})_{\mu} \Leftarrow e_B^O \wedge (e_{BO}^D)_{\xi} \wedge (e_{ПР}^D)_{\xi}, \quad (6)$$

де μ і ξ – індекси рівнів етапів, на яких відповідно досліджуються інформаційне забезпечення вибору й інформаційна визначеність структурного елемента, що вибирається.

Принцип етапності вибору має важливе методологічне значення для обґрунтованого прийняття остаточного проектного рішення, тому що на перших етапах розробник не володіє всім необхідним спектром інформації про структурні елементи e_i^O і e_j^D для остаточного прийняття рішення по структурному елементу e_i^{III} і, рухаючись за ланцюгом $(e_i^{III})_1 \rightarrow (e_i^{III})_2 \rightarrow \dots \rightarrow e_i^{III}$, за рахунок послідовного наближення та конкретизації можна досягти оптимального остаточного результату.

Не менш важливе значення в задачі вибору альтернативних технічних рішень визначення структурних елементів РС має задача визначення тієї області можливих рішень, у межах якої повинен здійснюватися вибір. Можна виділити 4 наступні області.

Перша область відповідає множині E_{i1}^{III} матеріально реалізованих і вже готових технічних рішень структурного елемента i -го виду. Наприклад, такою множиною може бути парк верстатного обладнання з ЧПК, парк ПР, наявний запас РІ, якими володіє підприємство тощо.

Друга область відповідає множині E_{2i}^{III} вже готових рішень, на які є вся необхідна технологічна та конструкторська документація, тобто перша область входить до складу другої:

$$E_{1i}^{III} \subset E_{2i}^{III}. \quad (7)$$

Третя область відповідає множині E_{3i}^{III} всіх відомих проектних рішень, у тому числі й таких, на які необхідна технологічна та конструкторська документація відсутня:

$$E_{1i}^{III} \subset E_{2i}^{III} \subset E_{3i}^{III}. \quad (8)$$

Підмножина $E_{3i}^{III} \setminus E_{2i}^{III}$ множини E_{3i}^{III} об'єднує всі ті технічні рішення, які можна знайти в інформаційних джерелах.

Четверта область відповідає множині E_{4i}^{III} всіх можливих допустимих технічних рішень:

$$E_{1i}^{III} \subset E_{2i}^{III} \subset E_{3i}^{III} \subset E_{4i}^{III}. \quad (9)$$

Залежно від умов проведення ТПРВ і проектування РС у вищенаведену ієрархічну множинну структуру можуть бути додані специфічні умови на визначення відповідних областей можливих технічних рішень. Як приклад, це може бути область технічних рішень, що регламентується галузевими стандартами, каталогами та типажами. Очевидно, що ця область буде відповідати підмножині множини E_{3i}^{III} .

Нині у практиці ТПРВ усе більше поширюється застосування інформаційно-пошукових систем (ІПС) технологічного призначення, що призначені для пошуку, видачі та збереження довідкової та нормативної інформації та інформації щодо технічних рішень елементів РС. Функціонування ІПС технологічного призначення засноване на використанні масивів інформації, які за своєю суттю належать до областей множин E_{1i}^{III} і E_{2i}^{III} . Розвиток ІПС технологічного призначення варто вважати одним з найголовніших напрямків удосконалення методів вибору структурних елементів РС. Використання ІПС технологічного призначення дозволяє з масиву збереженої інформації E_{2i}^{III} з гарантованою повнотою оперативно отримувати всю множину можливих технічних рішень (e_i^{III}) , які відповідають запитам проектувальника.

У загальному вигляді синтез пошукового припису (ПП) й отримання відповідних технічних рішень може бути записане в такому вигляді:

$$E_i^O \wedge E_j^D \Rightarrow \text{ПП}_k \Leftrightarrow (e_k^{III}) \subset E_{2k}^{III}. \quad (10)$$

У результаті функціонування ІПС технологічного призначення проектувальник отримує підмножину (e_i^{III}) . Від складу цієї множини залежить подальший хід робіт з проектування РС, під час яких можуть виникати такі ситуації.

Перша ситуація, коли $(e_i^{III}) = e_i^{III}$, тобто було отримано єдине рішення, яке приймається за остаточне. Друга ситуація, коли e_i^{III} містить декілька технічних рішень, з яких на основі аналізу та техніко-економічних розрахунків проектувальникові необхідно вибрати остаточне єдине рішення. Третя ситуація, коли $(e_i^{III}) = \emptyset$, тобто взагалі не було отримано технічних рішень. Зрозуміло, що така ситуація найбільш важка для проектувальника. У разі виникнення цієї ситуації можливі два шляхи подальшого проведення проектних робіт.

Перший шлях – це зміна початкових умов ПП, головним чином за рахунок зміни інформації про додатково обумовлюючі структурні елементи e_j^D . При цьому технічні рішення, які були отримані з ІПС технологічного призначення, виявляються менш важливими щодо первісного запиту і, як слідство, вимагають ретельного аналізу на предмет їх подальшого використання і відповідного додаткового проектного пророблення.

Другий шлях – це пропрацювання нових технічних рішень, що перебувають за межами області E_{2i}^{III} , тобто таких масивів інформації, яких не існує в ІПС технологічного призначення. У даному випадку проектувальник має можливість:

– по-перше, здійснювати пошук технічних рішень на рівні патентного або бібліографічного пошуку, тобто тих рішень, які відповідно наведеній вище систематизації знаходяться в області підмножини $E_{3i}^{III} \setminus E_{2i}^{III}$;

– по-друге, почати розроблення принципово нових технічних рішень, які найбільш повно відповідають поставленим вимогам. Фактично такі рішення знаходяться в області підмножини $E_{4i}^{III} \setminus E_{3i}^{III}$.

З розгляду вказаних вище ситуацій можливі такі обставини:

– сучасні ІПС технологічного призначення, в основі яких лежать масиви інформації, що належать області E_{2i}^{III} , в умовах ТПРВ і проектування РС не можуть повністю задовольнити інформаційні потреби проектувальника, особливо у випадку, коли виникає третя ситуація;

– у тих випадках, коли засобами ІПС технологічного призначення знайдено варіанти технічних рішень (перша та друга ситуації), буде відсутня будь-яка гарантія, що ці рішення раціональніші за ті, які можуть існувати в областях множин E_{3i}^{III} і E_{4i}^{III} .

З вищезазначеного випливає, що подальший розвиток ІПС технологічного призначення необхідно орієнтувати на створення та використання таких масивів інформації, організаційна основа яких містить морфологічні принципи класифікації ймовірних можливих технічних рішень структурних елементів РС. Морфологічний класифікатор (МК) формально описує область множини E_{4i}^{III} і, тим самим, надає можливість систематизувати опис областей множин E_{1i}^{III} , E_{2i}^{III} і E_{3i}^{III} . Це означає, що в полі МК відповідно можуть бути відзначені структурні елементи, що належать всім множинам. У результаті пошуку можливих технічних рішень у полі МК останні можуть бути знайдені проектувальником у кожній з областей. Остаточний вибір альтернативного варіанта повинен проводитися на основі техніко-економічного аналізу з урахуванням усіх можливих витрат на реалізацію даного варіанта. Пропонується, що побудова МК, яка забезпечує максимально повне охоплення всіх можливих технічних рішень будь-якого структурного елемента РС, складається з чотирьох етапів.

Перший етап полягає у виявленні характерних ознак i -го класу структурних елементів РС як об'єктів проектування або вибору. Кожна з обраних ознак обов'язково повинна відбивати певний аспект функціональної, конструктивної або фізичної сутності класу структурних елементів, які розглядається, та забезпечувати інформативність опису, якої буде достатньою для здійснення вибору варіантів за заданим пошуковим приписом. Обрана сукупність ознак розглядається як низка характеристичних функцій, які утворюють базис простору ймовірних технічних рішень.

Другий етап полягає у визначенні вектора дискретних станів для кожної характеристичної функції. Складність цього етапу полягає в тому, що, по-перше, на даному етапі необхідно з максимальною повнотою формувати всю множину ймовірних дискретних станів для кожної функції, що надалі буде гарантувати морфологічну повноту МК, і по-друге, на цьому етапі відсутні будь-які принципи визначення складу множини дискретних станів. Для кожного конкретного випадку визначення складу множини дискретних станів окреслюється специфічними особливостями характеристичної функції та залежить від кваліфікації, досвіду і творчих здібностей розробника МК.

У самому загальному випадку можливо запропонувати два методи аналізу. Перший метод – це комбінаторний аналіз, при якому дискретні стани функції представляють собою певні комбінаторні перестановки P_n або сполучення C_n^m елементарних взаємозалежних ознак, які утворюють кожний із дискретних станів.

Другий метод – це морфологічний аналіз, при якому дискретні стани функції отримуються прямим добутком декількох сукупностей елементарних як взаємозалежних, так і взаємозалежних ознак.

Якщо характеристична функція по своїй суті являє собою непереривну множину певних величин, тобто має якесь кількісне вираження, то всі дискретні стани такої функції утворюються шляхом її поділення на відповідні діапазони.

У результаті виконання другого етапу кожна характеристична функція може бути записана як вектор дискретних станів. Наприклад:

$$X(x_i) = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n); \tag{11}$$

$$Y(y_j) = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m); \tag{12}$$

...

$$V(v_k) = (v_1, v_2, \dots, v_k, \dots, v_p); \tag{13}$$

$$W(w_q) = (w_1, w_2, \dots, w_q, \dots, w_r). \tag{14}$$

Прямий добуток усіх отриманих векторів надає можливість отримати шукану множину можливих альтернативних варіантів технічних рішень класу III структурних елементів:

$$X(x_i) \cdot Y(y_j) \cdot \dots \cdot V(v_k) \cdot W(w_q) = E_{4t}^{III}. \tag{15}$$

Третій етап полягає в побудові математичної моделі МК. Принцип побудови МК спрямований на приведення N-мірної моделі класифікації до такого вигляду, що може забезпечити графічну побудову МК. Для досягнення поставленої мети формуються парні добутки векторів типу (16).

$$(X(x_i) \cdot Y(y_j)) \cdot \dots \cdot (V(v_k) \cdot W(w_q)) = E^1 \cdot E^2 \cdot \dots \cdot E^u = E_{4t}^{III}. \tag{16}$$

Допускається довільне попарне об'єднання функцій, однак найбільш доцільним буде об'єднання взаємозумовлених характеристичних функцій, що полегшить виконання четвертого етапу побудови МК.

Прямий добуток кожної пари функцій являє собою матрицю властивостей, що характеризують усі можливі поєднання дискретних станів характеристичних функцій, які перемножуються, і має наступний вигляд:

$$E^1 = \begin{bmatrix} x_1 y_1 & x_2 y_1 & \dots & x_i y_1 & \dots & x_n y_1 \\ x_1 y_2 & x_2 y_2 & \dots & x_i y_2 & \dots & x_n y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1 y_j & x_2 y_j & \dots & x_i y_j & \dots & x_n y_j \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1 y_m & x_2 y_m & \dots & x_i y_m & \dots & x_n y_m \end{bmatrix}. \tag{17}$$

Аналогічним чином записуються матриці E^2, \dots, E^u .

Множина E_{4t}^{III} , яка була утворена як добуток просторів, що визначаються множинами E^2, \dots, E^u , також може бути записана у вигляді матриці:

$$x_i \cdot y_j \cdot \dots \cdot v_k \cdot w_q = e_{ts}^{III} \in E_{4t}^{III}. \tag{18}$$

Елементи матриці (18) – це сполучення всіх дискретних станів характеристичних функцій.

Принцип утворення матриці у графічному вигляді, що відображає множину E_{4t}^{III} і являє собою модель МК, наведено на рис. 2. З практичної точки зору кожний елемент e_{ts}^{III} МК відповідає певному ймовірному технічному рішенню, характеристики якого визначають за дискретними станами по координатах даного елемента у матриці класифікатора.

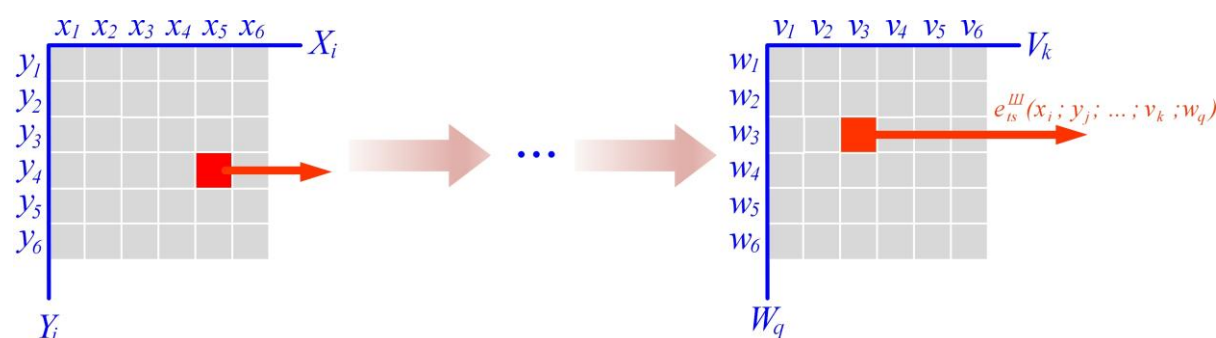


Рис. 2. Модель морфологічного класифікатора

Джерело: розроблено авторами.

Із самої суті побудови моделі МК очевидно, що кількість усіх характеристичних функцій, згідно з якими класифікуються об'єкти аналізу, теоретично може бути необмеженою. На практиці це означає, що множина ймовірних технічних рішень, що класифікуються, за рахунок збільшення кількості ознак, які характеризують об'єкти розгляду, у разі потреби може розглядатися з різними ступенями деталізації. Однак треба мати на увазі, що надмірна деталізація може призвести до значного збільшення розмірів класифікатора, що, у свою чергу, ускладнить його практичне використання.

Четвертий етап полягає у побудові класифікатора проектних рішень.

Побудована на третьому етапі матриця МК відбиває всю ймовірну множину варіантів технічних рішень. Загальна кількість можливих варіантів визначається добутком $n \cdot m \cdot \dots \cdot p \cdot r$ і, зрозуміло, може досягти великого значення. Проте слід зазначити, що не кожен з альтернативних варіантів технічних рішень буде являти собою практично здійсненне та економічно доцільне рішення. Тому на цьому етапі здійснюється аналіз матриць, з яких складається МК, і виділення практично можливих, а згодом і економічно доцільних поєднань дискретних станів.

Висновки. Як висновки слід зазначити, що розроблення МК технічних рішень структурних елементів РС дозволяє:

- 1) у систематизованому вигляді охопити не тільки вже всі існуючі на виробництві технічні рішення, але й знайти такі, створення яких можливе і доцільне;
- 2) відзначити у полі МК існуючі технічні рішення, які вже реалізовані безпосередньо на виробництві, або ті, які забезпечені технічною документацією, що буде сприяти мінімізації часу пошуку та оперативному вибору готових рішень;
- 3) формалізувати процедуру вибору структурних елементів РС з урахуванням усіх конкретних обмежень та виробничих умов.

Список використаних джерел

1. Іванов, В. О. Технологічні основи гнучких автоматизованих виробництв / В. О. Іванов, І. М. Дегтярьов. – Суми : СумДУ, 2022. – 203 с.
2. Пуховський, Є.С. Проектування гнучких виробничих систем машинобудування 6 навч. посіб. / Є. С. Пуховський, Ю. М. Малафеев, С. С. Добрянський. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 204 с.
3. Геометричний аспект вибору моделей основного технологічного обладнання / С. Лапковський, Л. Данилова, В. Фролов, В. Приходько, М. Гладський // Технічні науки та технології. – 2023. – № 4(30). – С. 40-49. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-40-49](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-40-49).
4. Приходько, В. П. Розроблення та розрахунок конструкцій верстатних пристроїв : навч. посіб. / В. П. Приходько. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 89 с.
5. Автоматизація виробничих процесів : підручник / І. В. Ельперін, О. М. Пулена, В. М. Сідлецький, С. М. Швед. – Київ : Ліра-К, 2017. – 378 с.
6. 10 Tips For Selecting the Perfect CNC Machine [Electronic resource] / Supplier Shop Tips. – Access mode: <https://www.xometry.com/resources/shop-tips/10-tips-for-selecting-the-perfect-cnc-machine/>.

7. 7 Steps to Choosing the Right CNC Machine Tool [Electronic resource] / Hwacheon. – Access mode: <https://hwacheonasia.com/7-steps-choosing-right-cnc-machine-tool>.
8. Choosing a CNC Machine: 4 Key Aspects to Consider [Electronic resource] / Machinemfg. – Access mode: <https://www.machinemfg.com/how-to-choose-cnc-machine>.
9. Top 6 Trends Shaping the CNC Machine Tool Industry [Electronic resource] / Machinemfg. – Access mode: <https://www.machinemfg.com/major-trends-in-the-cnc-machine-tool-industry>.
10. 8 Important Considerations When Selecting CNC Machine Cutting Tools [Electronic resource] / Stecker Machine Blog. – Access mode: <https://www.steckermachine.com/blog/selecting-cnc-machine-cutting-tools>.
11. Arezoo, B. Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system / B. Arezoo, K. Ridgway, A. M. A. Al-Ahmari // Computers in Industry. – 2000. – № 1 (42). – С. 43-58. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(99\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(99)00051-2).
12. Introduction About Tool Steel [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sansmachining.com/introduction-about-tool-steel>.
13. Selection of CNC Machining Tools and Determination of Cutting Amount [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sansmachining.com/selection-of-cnc-machining-tools-and-determination-of-cutting-amount>.
14. Choosing the right Manufacturing robots for your needs [Electronic resource]. – Access mode: <https://standardbots.com/blog/how-to-choose-the-right-manufacturing-robot-for-your-needs>.
15. Factors to consider while selecting appropriate industrial robots [Electronic resource]. – Access mode: <https://roboticsbiz.com/factors-to-consider-while-selecting-appropriate-industrial-robots>.
16. Industrial robot selection procedure [Electronic resource] / Intelligent e-learning systems in robotics/mechatronics. – Access mode: <https://www.tthk.ee/inlearcs/3-industrial-robot-selection-procedure>.
17. Advantages of CNC Machining over Conventional [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.fairlawntool.com/blog/advantages-cnc-machines>.
18. Factors to Consider When Choosing a CNC Machine [Electronic resource] / Cncgoldmine. – Access mode: <https://cncgoldmine.com/factors-to-consider-when-choosing-a-cnc-machine>.
19. How to Choose the Right CNC Machine for Your Business [Electronic resource] / Scan2CAD – Access mode: <https://www.scan2cad.com/blog/cnc/choose-cnc-machine>.
20. 3 Tips For Choosing The Right Type Of Clamp [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.murraycorp.com/post/3-tips-for-choosing-the-right-type-of-clamp>.
21. Clamping or Positioning: Which Comes First in Part Machining? [Electronic resource] / Machinemfg. – Access mode: <https://www.machinemfg.com/clamping-or-positioning>.
22. Unlocking Precision: A Guide To CNC Fixtures In Machining [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sansmachining.com/unlocking-precision-a-guide-to-cnc-fixtures-in-machining>.
23. Advantages of Automated Storage and Retrieval System in Different Industries. [Electronic resource] / Material Handling. – Access mode: <https://www.srsi.com/advantages-of-automated-storage-and-retrieval-system>.
24. Benefits Of Using A Conveyor System. [Electronic resource] / 6 Main Benefits of Conveyor Systems – Access mode: <https://diamondphoenix.co.uk/diamond-phoenix-news/6-main-benefits-of-conveyor-systems>.
25. What are Automated Material Handling Systems? AMHS Equipment and Benefits. [Electronic resource] / Material Handling. – Access mode: <https://www.srsi.com/what-is-automated-material-handling-system>.
26. 6 Types of Warehouse Storage Systems [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.camcode.com/blog/types-of-warehouse-storage-systems>.
27. What to Look for When Choosing a Warehouse [Electronic resource] / Warehousing & Fulfillment. – Access mode: <https://www.easyship.com/blog/how-to-select-a-warehouse>.
28. How to Build an Automated Warehouse [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.camcode.com/blog/how-to-build-an-automated-warehouse>.

References

1. Ivanov, V.O., & Dehtiarov, I.M. (2022). *Tekhnologichni osnovy hnuchkykh avtomatyzovanykh vyrobnytstv [Technological foundations of flexible automated production]*. Sumskyi derzhavnyi universytet.

2. Pukhovskiy, Ye.S., Malafieiev, Yu.M., & Dobrianskiy, S.S. (2015). *Proektuvannia hnuchkykh vyrobnychkykh system mashynobuduvannia [Designing flexible production systems of mechanical engineering 6 studies. Manual]*. NTUU «KPI».
3. Lapkovskiy, S., Danylova, L., Frolov, V., Prykhodko, V., & Hladskiy, M. (2023). Heometrychnyi aspekt vyboru modelei osnovnoho tekhnolohichnoho obladdnannia [The geometrical aspect of the choice of models of basic technological equipment]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, 4(30), 40–49. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-40-49](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-40-49)
4. Prykhodko, V.P. (2022). *Rozroblennia ta rozrakhunok konstruksii verstatnykh prystroiv [Development and calculation of the designs of machine tools: training manual]*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.
5. Elperin, I.V., Pupena, O.M., Sidletskiy, V.M., Shved, S.M. (2017). *Avtomatyzatsiia vyrobnychkykh protsesiv [Automation of production processes: a textbook]*. Lira-K.
6. 10 Tips For Selecting the Perfect CNC Machine. (May 26, 2022). *Supplier Shop Tips*. <https://www.xometry.com/resources/shop-tips/10-tips-for-selecting-the-perfect-cnc-machine>.
7. 7 Steps to Choosing the Right CNC Machine Tool. (March 7, 2023). *Hwacheon*. <https://hwacheonasia.com/7-steps-choosing-right-cnc-machine-tool>.
8. Choosing a CNC Machine: 4 Key Aspects to Consider. (November 29, 2023). *Machinemfg*. <https://www.machinemfg.com/how-to-choose-cnc-machine>.
9. Top 6 Trends Shaping the CNC Machine Tool Industry. (September 19, 2023). *Machinemfg*. <https://www.machinemfg.com/major-trends-in-the-cnc-machine-tool-industry>.
10. 8 Important Considerations When Selecting CNC Machine Cutting Tools. (July 9, 2022). *Stecker Machine Blog*. <https://www.steckermachine.com/blog/selecting-cnc-machine-cutting-tools>.
11. Arezoo, B., Ridgway, K., Al-Ahmari, A.M.A. (2000). Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system. *Computers in Industry*, 1(42), 43–58. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(99\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(99)00051-2).
12. Introduction About Tool Steel. (January 31, 2023). *Blog*. <https://www.sansmachining.com/introduction-about-tool-steel>.
13. Selection of CNC Machining Tools and Determination of Cutting Amount. (April 12, 2022). *Blog*. <https://www.sansmachining.com/selection-of-cnc-machining-tools-and-determination-of-cutting-amount>.
14. Choosing the right Manufacturing robots for your needs. (July 13, 2023). *Featured*. <https://standardbots.com/blog/how-to-choose-the-right-manufacturing-robot-for-your-needs>.
15. Factors to consider while selecting appropriate industrial robots. (January 14, 2021). *Logistics & Industrial*. <https://roboticsbiz.com/factors-to-consider-while-selecting-appropriate-industrial-robots>.
16. Industrial robot selection procedure. (dateless). *Intelligent e-learning systems in robotics/mechanics*. <https://www.tthk.ee/inlearcs/3-industrial-robot-selection-procedure>.
17. Advantages of CNC Machining over Conventional. (October 17, 2022). *Blog*. <https://www.fair-lawntool.com/blog/advantages-cnc-machines>.
18. Factors to Consider When Choosing a CNC Machine. (8 жовтня 2023 року). *Cncgoldmine*. Взято 15 грудня 2023 р. <https://cncgoldmine.com/factors-to-consider-when-choosing-a-cnc-machine>.
19. How to Choose the Right CNC Machine for Your Business. (May 8, 2023). *Scan2CAD*. <https://www.scan2cad.com/blog/cnc/choose-cnc-machine>.
20. 3 Tips For Choosing The Right Type Of Clamp. (dateless). *Blogs*. <https://www.murray-corp.com/post/3-tips-for-choosing-the-right-type-of-clamp>.
21. Clamping or Positioning: Which Comes First in Part Machining? (September 25, 2023). *Machinemfg*. <https://www.machinemfg.com/clamping-or-positioning>.
22. Unlocking Precision: A Guide To CNC Fixtures In Machining. (December 12, 2023). *Blog*. <https://www.sansmachining.com/unlocking-precision-a-guide-to-cnc-fixtures-in-machining>.
23. Advantages of Automated Storage and Retrieval System in Different Industries.. (August 25, 2022). *Material Handling*. <https://www.srsi.com/advantages-of-automated-storage-and-retrieval-system>.
24. Benefits Of Using A Conveyor System. (July 18, 2022). *6 Main Benefits of Conveyor Systems*. <https://diamondphoenix.co.uk/diamond-phoenix-news/6-main-benefits-of-conveyor-systems>.
25. What are Automated Material Handling Systems? AMHS Equipment and Benefits. (November 25, 2021). *Material Handling*. <https://www.srsi.com/what-is-automated-material-handling-system>.
26. 6 Types of Warehouse Storage Systems. (August 9, 2023). *Blog*. <https://www.camcode.com/blog/types-of-warehouse-storage-systems>.

27. What to Look for When Choosing a Warehouse. (May 28, 2020). *Warehousing & Fulfillment*. <https://www.easyship.com/blog/how-to-select-a-warehouse>.

28. How to Build an Automated Warehouse. (August 9, 2023). *Blog*. <https://www.camcode.com/blog/how-to-build-an-automated-warehouse>.

Отримано 20.11.2023

UDC 621.865.8

**Volodymyr Kravets¹, Oleksandr Kravets², Serhii Lapkovsky³,
Volodymyr Frolov⁴, Maksym Gladskyi⁵, Liudmyla Danylova⁶**

¹Engineer of the Department of Machine Design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: bond118@meta.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0005-6867-4858>. **ResearcherID:** [ITU-8413-2023](https://orcid.org/0009-0005-6867-4858)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Design

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: om.kravets@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-7468-0956>. **ResearcherID:** [IUQ-7186-2023](https://orcid.org/0000-0002-7468-0956)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: Lapkovsky@ukr.net. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-9870-9231>. **ResearcherID:** [HCH-3837-2022](https://orcid.org/0000-0002-9870-9231)

⁴PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)

⁵PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: gladsky@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4547-7131>. **ResearcherID:** [Q-1624-2017](https://orcid.org/0000-0002-4547-7131)

⁶PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: ldanylova@outlook.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4442-3959>. **ResearcherID:** [ADU-9265-2022](https://orcid.org/0000-0002-4442-3959)

SYSTEM-STRUCTURAL ASPECT OF THE SELECTION ELEMENTS OF ROBOTIC SYSTEMS

The article is devoted to solving the problems of technological preparation of robotic production. Currently, the creation of robotic systems has acquired the status of a completely independent technological task, which is solved on the basis of a significant reduction in the terms of technological preparation of production and the creation of fundamentally new software and technical tools. The growth of technical equipment and the technical integration of production processes under the conditions of robotization, which is related to this, have a significant impact on the selection criteria of individual structural elements of robotic systems. In contrast to the created traditional production systems, in which the main structural elements implemented in the relevant design and technological solutions were only machine tools, technological equipment and cutting tools, in robotic systems the range of structural elements is significantly expanded: the robotic systems, in addition to the specified structural elements, contain technical means of control, industrial robots, transport equipment, technical means of storage, etc. It is quite obvious that now the methodology of creating robotic systems should go beyond solving only technical problems and should include a comprehensive and deep study of technology, management and organization, which are not only interdependent with related technical problems, but also directly affect their correct solution. The analysis of the latest researches and publications, which were devoted to the robotization of production, allows us to conclude that the problem of solving the task of a justified choice of structural elements of robotic systems is currently not formalized and not solved. The article offers methodological bases for the formalization of the process of selecting structural elements of robotic systems, taking into account the specific limitations and production conditions. The proposed methodology makes it possible to systematically cover not only all technical solutions already existing in production, but also to find those, the creation of which is possible and, in some cases, even expedient; find existing technical solutions that are already implemented directly in production or that are provided with technical documentation, which will help minimize search time and prompt selection of ready-made solutions.

Keywords: structural element; choice; technological preparation; robotic production; robotic system; industrial robot.

Fig. 2. References: 28.