

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-52-04>

УДК 62-503.56:621.717

Чибіряк Яна Іванівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-0634-7609>

Захарова Анна Миколаївна, студентка,

<https://orcid.org/0000-0001-5242-4065>

Лавров Євгеній Анатолійович, д.т.н., професор,

<https://orcid.org/0000-0001-9117-5727>

Великодний Дмитро Володимирович, к.ф.-м.н.,

<https://orcid.org/0000-0003-0044-5619>

Боровик Валентина Олександрівна, к.т.н., доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-3668-6302>

Сумський державний університет, м. Суми, Україна

МОДЕЛІ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПОШУКУ РАЦІОНАЛЬНИХ ВАРІАНТІВ КОМПОНУВАННЯ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ

Чибіряк Я. І., Захарова А. М., Лавров С. А., Великодний Д. В., Боровик В. О. Моделі для автоматизованого пошуку раціональних варіантів компонування виробів машинобудування. У даній роботі вирішено задачу моделювання раціональних варіантів компонування виробів машинобудування. Запропоновані математичні моделі дозволяють формалізувати поставлену задачу, враховують структуру і технологічні закономірності виробів, що впливають на послідовність складання. Завдяки математичним моделям, побудованим на основі ситуативного моделювання, теорії матриць, графів забезпечується можливість компактного зберігання і зручного оперування вхідними даними у поєднанні з математичною сумісністю поставленої задачі синтезу варіантів складання. В основу методу, представленого в роботі, покладено правила ранжування, що враховують конструкторські та технологічні особливості складального процесу. Перевага методу полягає в тому, що здійснюється пошук варіантів складання, раціональних по часовій тривалості. Це досягається завдяки оптимальному поділу структури виробу на незалежні складальні одиниці, що можуть збиратися одночасно, мінімізації кількості складальних позицій та паралельній реалізації складальних операцій. На основі методу розроблено алгоритм, спрямований на комп'ютерну реалізацію автоматизованого пошуку раціональних варіантів компонування виробів машинобудування.

Ключові слова: послідовність складання, виріб, матриця базування, матриця доступу, матриця екологічних обмежень, матриця розмірних зв'язків, структура виробу.

Chybyriak Y. I., Zakharova A. M., Lavrov E. A., Velykodnyi D. V., Borovyk V. O. Models for automated search for rational assembly options for mechanical engineering products. This paper solves the problem of modeling rational assembly options for mechanical engineering products. The proposed mathematical models allow us to formalize the task at hand, taking into account the structure and technological patterns of products that affect the assembly sequence. Thanks to mathematical models built based on situational modeling, matrix theory, and graphs, the possibility of compact storage and convenient operation of input data is provided, combined with the mathematical compatibility of synthesizing assembly options. The method presented in this paper is based on ranking rules that consider the design and technological features of the assembly process. The advantage of this method is that it searches for assembly options that are rational in terms of time duration. This is achieved by optimally dividing the product structure into independent assembly units that can be assembled simultaneously, minimizing the number of assembly positions, and implementing assembly operations in parallel. Based on this method, an algorithm is developed aimed at computer implementation of automated search for rational assembly options for mechanical engineering products.

Keywords: assembly sequence, product, base matrix, access matrix, environmental constraint matrix, dimensional relationship matrix, product structure.

Вступ. В умовах 4-ї промислової революції суттєво підвищуються вимоги до якості автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва [1-3]. Останні роки пов'язані з бумом досліджень, присвячених моделюванню процесів виробництва і впровадженню інтелектуальних технологій [4, 5] та систем гібридного інтелекту [6]. Не дивлячись на велику кількість досліджень, задача вибору оптимальної структури та організації роботи технологічних систем вирішена не до кінця. Особливо гостро постає проблема вирішення задачі оптимізації процесів складання. Раціональний синтез послідовності складання виробів з урахуванням нових викликів промислової революції, в тому числі екологічних і безпекових, є однією з найбільш актуальних задач для автоматизованих систем технологічної підготовки виробництва.

Визначення послідовності зборки відноситься до багатоваріантної задачі. Від обраного варіанту залежать такі показники як якість, собівартість, продуктивність виготовлення, тривалість технологічного процесу. Дана задача є слабо структурованою та відноситься до класу задач, що важко піддаються формалізації. Відомо, що автоматизація технологічних процесів лежить в основі підвищення якості продукції, тому важливо проектувати таку послідовність складання, яка в процесі реалізації передбачає можливість використання засобів автоматизації.

Моделювання є ефективним інструментом пошуку раціональних і найменш витратних способів вирішення складних багатоваріантних задач [7, 8]. У результаті моделювання процесів у автоматизованих людино-машинних системах ми отримуємо інформацію, потрібну для прийняття рішень в умовах невизначеності [9, 10]. Для автоматизованої системи технологічної підготовки виробництва необхідні нові математичні моделі структури виробу, технологічного процесу та впливу виробництва на навколишнє середовище, що визначають умови вирішення задачі раціонального складання.

Аналіз існуючих досліджень та публікацій. Складання є заключним етапом виготовлення, тому від даного етапу залежить якість готової продукції. Обсяг складальних робіт у машинобудуванні становить 20-40% від загальної трудомісткості виготовлення, у приладобудуванні цей показник є вищим – до 40-70%. Така ситуація пояснюється відсутністю впровадження новітніх розробок та інформаційних технологій, відсутністю програмного забезпечення високої надійності, несумісністю засобів обчислювальної техніки [11, 12]. Тому саме у складальному виробництві спостерігається низький рівень механізації та автоматизації.

Виробнича практика підтверджує, що скорочення технологічного процесу складання по тривалості впливає на зниження трудомісткості та собівартості виробів. Щоб цього досягти необхідно врахувати цілий комплекс факторів технологічного процесу [15, 16]. Порівняно з механообробним виробництвом, у машинобудуванні складальні процеси почали удосконалювати значно пізніше. Це було зумовлено такими факторами: можливістю вручну зібрати виріб та складністю автоматизації складальних операцій. Складальні автоматизовані комплекси є недешевими у використанні та потребують багато часу на виробництво. Водночас для виробів, що випускаються, спостерігається скорочення життєвого циклу. В таких умовах складальне обладнання зазнає більш швидкого морального старіння у порівнянні з їх фізичним зношенням [17, 18]. Тому виникає потреба створювати гнучкі складальні системи, що здатні переналагоджуватися в міру зміни виробів, що випускаються. Такі складальні системи є дорогими у придбанні і використанні, також технічні засоби для їх реалізації у промисловості поки що відсутні. Тому переважає ручне виконання більшості складальних операцій із залученням спеціалістів, робота яких відрізняється монотонністю, одноманітністю та низькою ефективністю. Як наслідок, готові вироби мають низьку якість виготовлення [19].

Час і якість проектування технологічних процесів складання багато в чому пов'язані з використанням обчислювальної техніки, що потребує формалізованого опису технологічного процесу. Необхідно виявити основні закономірності протікання технологічного процесу складання та виконати їх математичний опис [17, 18, 20-23].

Забруднення навколишнього середовища є сучасною проблемою, яка постає перед машинобудівною галуззю. Мінімізація шкідливого впливу на середовище та стан людей, задіяних у виробництві, є актуальною задачею, яка повинна вирішуватися за рахунок розробки і впровадження нових методів та технологій [10, 15-18]. Для складального виробництва до екологічно небезпечних відносять операції, які супроводжуються шумом, вібраціями, підвищеними температурами, радіацією, використанням токсичних матеріалів (клеїв, фарб). Це операції з'єднання з натягом, склеювання, спаювання, зварювання та інші. Врахування впливу на екологію та безпеку робочого процесу є важливим фактором підвищення техніко-економічних показників складального виробництва. На жаль, під час розробки технологічних процесів складання питання екології майже не розглядаються.

В даний час існує два основних підходи проектування технологічних процесів: алгоритмічний та евристичний. Алгоритмічний метод заснований на використанні системного підходу і математичного моделювання. Проектування технології складання полягає в обробці вхідної інформації, побудові на її основі математичної моделі виробу, розробці множини оптимальних послідовностей складання у відповідності до закладеного алгоритмічного та програмного забезпечення [20, 22, 24]. Якщо виріб не складний і містить невелику кількість елементів, множину оптимальних варіантів компонування виробу можна отримати шляхом простого перебору. Для складних багатоелементних виробів зростає кількість можливих перестановок, тому навіть з використанням програмних засобів такий перебір практично неможливо реалізувати. У цьому випадку, щоб охопити усю множину варіантів складання та досягти оптимального рішення необхідно побудувати модель складального процесу, яка забезпечить цілеспрямований пошук раціонального варіанту [20-22].

На практиці для вирішення задачі побудови раціонального варіанту складання застосовують різні методи. Серед методів відомі теорія підтримки прийняття рішень, наприклад, у роботах [21, 24]. Методи машинного навчання, теорія множин, матриць, графів знайшли практичне використання в роботах [14, 19], пов'язаних з проектуванням технологічних процесів складання. Стандартні алгоритми рішення транспортної задачі використовуються при визначенні оптимальних варіантів послідовності складання у випадку багатокомпонентного виробу. Дана задача зводиться до пошуку найкоротшого шляху між вершинами графа з використанням методів лінійного та динамічного програмування [18, 21]. При цьому, вершини графа сітьової моделі відповідають деталям виробу, а ребрам графа присвоюються вагові коефіцієнти, що характеризують критерій ефективності, наприклад, тривалість складання, собівартість та ін. При автоматизованому проектуванні складальних процесів також застосовують математичні методи теорії оптимізації, ймовірності, методи обчислювальної та дискретної математики [16-20]. Ефективність використання методів оптимізації при проектуванні раціональних технологічних процесів залежить від правильного вибору критерію та цільової функції [22–24].

Таблиця 1 містить результати аналізу методів, які використовують для моделювання послідовності складання. Аналіз показав, що існує практичний досвід та виявлено закономірності процесу синтезу раціональних варіантів компонування виробів. Недолік полягає в тому, що враховано неповний комплекс факторів, необхідних для автоматизованого вирішення даної задачі.

Табл. 1. Найбільш застосовні методи для побудови варіантів складання виробів

Метод \ Враховані критерії	Динамічне програмування	Машинне навчання	Лінійне програмування	Ситуативне моделювання
Квалітети точності деталей	+	+	+	–
Техніка безпеки, екологія	–	–	–	–
Ієрархічна структура виробу	+	+	+	–
Розмірні зв'язки у виробі	–	+	–	+
Габаритні розміри та маса деталей	–	+	+	–
Зв'язки базування	+	+	+	+
Зв'язки передування	+	+	+	+

Постановка задачі .

Метою даної роботи є розробка математичних моделей та методу моделювання варіантів послідовності складання виробу з урахуванням конструкторсько-технологічних характеристик деталей та технологічних особливостей складального процесу.

Для досягнення поставленої мети у роботі визначено наступні задачі:

- виконати формалізацію складального процесу з використанням методів теорії графів, матриць;
- з використанням побудованих математичних моделей розробити метод, що дозволяє отримати множину варіантів компонування виробу;
- розробити алгоритмічне забезпечення рішення поставленої задачі.

Виклад основного матеріалу та обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Комплексна автоматизація виробництва належить до актуальних і складних наукових задач. Для автоматизації проектування складальних процесів необхідно подати математичну постановку, що забезпечить її вирішення комп'ютерними засобами.

Для визначення відповідності структури виробу виробничій системі, доцільно представити їх у вигляді математичних моделей. Структуру виробу можна представити графом Gr_v . (рис. 1), у якому вершини відповідають деталям або складальним одиницям, а ребра – зв'язкам між ними.

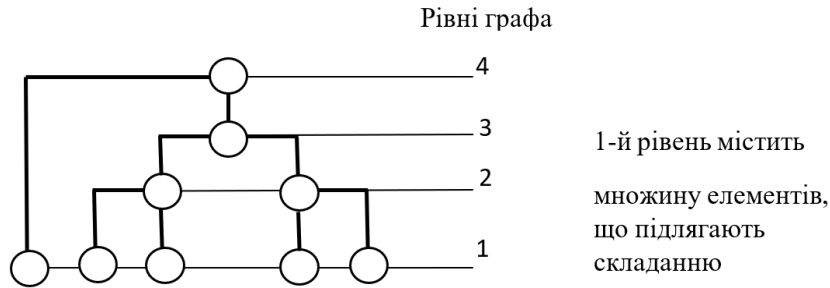


Рисунок 1 – Приклад графу $G_{Гв}$ структури виробу з п'яти деталей

Структура виробничої системи представляється графом $G_{Гв.с}$, (рис. 2), у якому вершинам відповідають операційні комплекси (ОК), а ребрам – транспортні маршрути між ними.

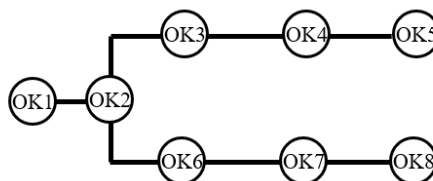


Рисунок 2 – Приклад графу $G_{Гв.с}$ структури виробничої системи з восьми операційних комплексів

Графи $G_{Гв}$ та $G_{Гв.с}$, що описують структуру виробу та виробничої системи, доцільно представити у матричному вигляді.

Матриця структури виробу:

$$Mt_{Гв} = [k \times k],$$

де k – кількість деталей у структурі виробу.

Елементи матриці $Mt_{Гв}$:

$$Mt_{Гв} [i][j] = \begin{cases} 1, \text{ якщо з'єднання } i \text{ виконується перед з'єднанням } j \\ 2, \text{ якщо з'єднання } i \text{ та } j \text{ можуть бути реалізовані одночасно} \\ 3 - \text{ у інших випадках } (i, j - \text{ порядкові номери з'єднань у виробі}) \end{cases}$$

Матриця структури виробничої системи:

$$Mt_{Гв.с} = [n \times n],$$

де n – кількість операційних комплексів (ОК) у автоматизованій виробничій системі.

Елементи матриці $Mt_{Гв.с}$:

$$Mt_{Гв.с} [i, j] = \begin{cases} 0 - \text{ між } i\text{-м та } j\text{-м ОК-ми відсутній зв'язок} \\ 1 - i\text{-й може бути використаний після } j\text{-го} \\ 2 - i\text{-й та } j\text{-й ОК-си можуть застосовуватись одночасно} \\ 3 - i\text{-й та } j\text{-й ОК-си можуть застосовуватись у довільній послідовності} \\ (i, j - \text{ порядкові номери операційних комплексів}) \end{cases}$$

Для встановлення взаємозв'язку між матрицями $Mt_{Гв}$ і $Mt_{Гв.с}$ доцільно використовувати масив операційних комплексів $Mt_{ок}$, що пов'язує складальні операції з технологічними можливостями ОК-сів.

$$Mt_{ок} = [n \times s],$$

де s – кількість складальних операцій (СО) у виробі.

Номер СО \ Номер ОК	1	2	...	n
1	1	0	...	1
2	1	1	...	0
...
s	0	0	...	1

$$M_{\text{ок}} [i][j] = \begin{cases} 1 - \text{на } j\text{-му ОК-сі може бути реалізована } i\text{-та складальна операція} \\ 0 - \text{у протилежному випадку} \end{cases}$$

Матриця з'єднань $M_{\text{з}}$ [$k \times k$] пов'язує номер складального елемента у виробі з кодом складального з'єднання і його характеристиками:

$$M_{\text{з}} [i][j] = \begin{cases} s - \text{якщо } i\text{-та і } j\text{-та деталі утворюють складальне з'єднання} \\ \quad (s - \text{код складальної операції}) \\ 0 - \text{відсутнє складальне з'єднання між } i\text{-ю і } j\text{-ю деталями} \end{cases}$$

Взаємозв'язок між складовими елементами у виробі визначається наявністю між їх поверхнями зв'язків спряження і положення. Дві деталі спрягаються по спільному контуру, якщо між ними існує зв'язок базування. Зв'язки базування поділяються на основні і допоміжні. Основний зв'язок базування має місце, якщо між деталями існує певний вид складального з'єднання. Математична модель, що відображає зв'язки базування у виробі позначимо матрицею $M_{\text{б}}$ [$k \times k$]:

$$M_{\text{б}} [i][j] = \begin{cases} 1 - \text{якщо між } i\text{-ю і } j\text{-ю деталями існує основний зв'язок базування} \\ 0 - \text{відсутній зв'язок базування між } i\text{-ю і } j\text{-ю деталями} \end{cases}$$

Орієнтація одних деталей відносно інших визначається не лише наявністю контактів між поверхнями, а й розмірними зв'язками – діаметральними, радіальними, кутівими, лінійними. Розміри складального розмірного ланцюга, реалізуються у послідовності, що визначається порядком входження деталей у виріб, які утворюють цей ланцюг.

Наявність розмірних зв'язків у виробі представимо матрицею $M_{\text{рзв.}}$ [$k \times k$], елементи якої:

$$M_{\text{рзв.}} [i][j] = \begin{cases} 1 - \text{якщо поверхні } i\text{-ї і } j\text{-ї деталей утворюють складову ланку розмірного} \\ \quad \text{ланцюга} \\ r - \text{якщо поверхні } i\text{-ї і } j\text{-ї деталей утворюють замикаючу ланку розмірного} \\ \quad \text{ланцюга} \end{cases}$$

Змінна r – ціле число, що набуває різних значень залежно від способу досягнення точності компенсуючої ланки складального розмірного ланцюга.

На послідовність компонування виробу впливають зв'язки передування між деталями, які визначають взаємне обмеження доступу під час складання, зумовлене конструкцією виробу та обладнанням, що застосовується. Такі обмеження можна описати матрицею доступу.

Елементи матриці доступу $M_{\text{д}}$ [$s \times s$] задають порядок виконання складальних операцій:

$$M_{\text{д}} [i][j] = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-та складальна операція виконується перед } j\text{-ю} \\ 0 - i\text{-та і } j\text{-та складальні операції не мають строгої послідовності виконання} \end{cases}$$

Якщо у виробі присутні екологічно небезпечні операції, виконання яких супроводжуються вібрацією, шумом, підвищенням температури (зварювання, склеювання, спаювання) їх необхідно проводити на окремих робочих дільницях з дотриманням санітарних норм та вимог техніки безпеки. Для врахування даного фактору під час реалізації складання виробу, екологічно несприятливі операції слід відокремлювати у окремі складальні одиниці.

Екологічні фактори складального процесу доцільно представити матрицею екологічних обмежень $M_{\text{е}}$ [$s \times s$]:

$$M_{\text{е}} [i][j] = \begin{cases} 1 - i\text{-та складальна операція є екологічно несприятливою} \\ 0 - \text{у протилежному випадку} \end{cases}$$

Опис структури виробу та його конструкторсько-технологічних ознак у матричній формі надають можливість у математичному вигляді формалізувати задачу визначення послідовності складання, також матриці є зручними для зберігання інформації в оперативній пам'яті комп'ютера. Дану формалізацію покладено в основу розробки методу побудови раціональної послідовності складання та його програмної реалізації.

Побудова варіантів складання здійснюється з використанням розроблених математичних моделей.

На 1-му етапі відбувається поділ виробу на окремі складальні одиниці. За матрицею доступу $M_d [s \times s]$ визначаються номери деталей, які можуть виступати як базові в конструкції виробу. За схемою базування $M_b [k \times k]$ до кожної базової деталі добирається множина базованих елементів. У результаті маємо набір графів $G_{b_i} (i=1 \div m)$, що визначають максимальний поділ виробу на окремі складальні вузли (m – кількість складальних вузлів, на яку поділено виріб) (рис. 3).

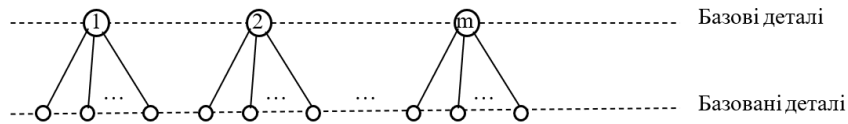


Рисунок 3 – Поділ виробу на m складальних вузлів

На 2-му етапі серед множини графів $G_{b_i} (i=1 \div m)$ визначаються графи зі спільними вершинами. Такі графи групуються у залежні графи. В кожній залежній групі проводиться ранжування графів з присвоєнням їм математичного рангу, який визначає порядок входження складальних одиниць до виробу. Ранжування проводиться у 5 кроків, в його основу покладено технологічні правила зборки.

1-й крок ранжування полягає у розрахунку ступеню зв'язності графів за співвідношенням:

$$C_{зв,i} = \sum_{j=1}^{n_i} (k_j - 1),$$

де n_i – кількість вершин i -го графу;

k_j – кількість графів, що містять j -ту вершину.

Якщо після 1-го кроку отримано графи однакового рангу проводиться 2-й крок ранжування – за складністю будови. Граф, що містить більшу кількість елементів отримує менший ранг.

3-й крок ранжування: граф, що містить більшу кількість розмірних ланок отримує менший ранг (визначається за матрицею розмірних зв'язків $M_{r_{зв}} [k \times k]$).

4-й крок ранжування: за масою базових деталей. Граф з більшою масою кореневої вершини має менший ранг.

5-й крок ранжування: за габаритними розмірами базових деталей. Граф, що містить кореневу вершину з більшим габаритним розміром має менший ранг.

У кожній групі залежних графів останній ранг присвоюється складальній одиниці, яка містить замикаючу розмірну ланку (визначається за матрицею розмірних зв'язків $M_{r_{зв}} [k \times k]$). На практиці це забезпечує реалізацію замикаючої ланки в останню чергу для забезпечення потрібної точності розмірного ланцюга.

На наступному етапі визначається послідовність складання деталей в кожній складальній одиниці. За матрицею доступу з'єднань $M_d [s \times s]$ складальні елементи розташовуються відносно базової вершини на відповідних рівнях ієрархії з утворенням груп вершин по горизонталі і по вертикалі (рис. 4).

Групи деталей по вертикалі можуть бути зібрані з однієї складальної позиції. Оскільки групи не містять спільних деталей, тобто незалежні між собою, послідовність їх реалізації визначається ранжуванням.

Покрокове ранжування має наступне математичне формулювання. 1-й крок ранжування проводиться з використанням матриці розмірних зв'язків $M_{r_{зв}} [k \times k]$.

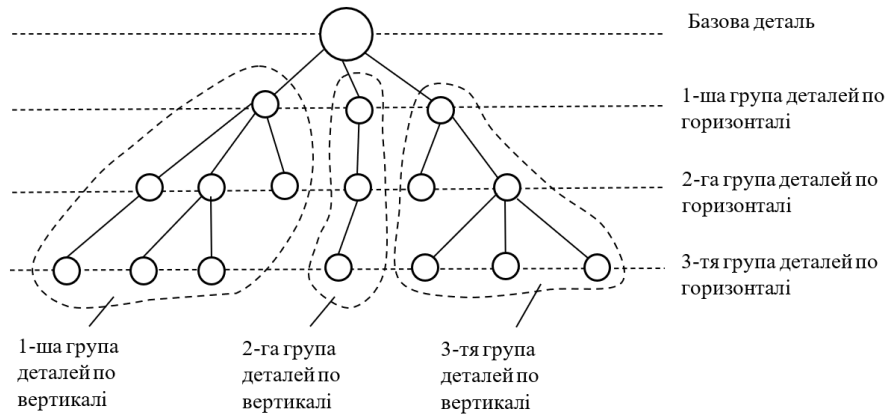


Рисунок 4 – Формування груп деталей по горизонталі та по вертикалі

Визначається кількість розмірних зв'язків, що входять до складу кожної групи по вертикалі. Група, що містить більшу кількість розмірних ланок має менший ранг.

2-й крок ранжування – за кількістю деталей, що мають вищі квалітети точності. Групі, що містить більшу кількість точних деталей присвоюється менший ранг.

На 3-му кроці ранжування за матрицею екологічних обмежень $M_{te} [s \times s]$ у групах по вертикалі виявляються екологічно несприятливі операції. Таким групам присвоюється останній ранг, незалежно від попередніх результатів ранжування. Це дозволяє відокремити небезпечні операції від інших і в подальшому виконувати їх на окремо обладнаних дільницях у кінці технологічного процесу.

Фізичний зміст ранжування полягає у мінімізації складальних позицій та у визначенні позиції, з якої слід почати процес складання. У результаті проведеного ранжування, групам по вертикалі присвоюється порядковий номер, що визначає послідовність їх реалізації. Групи деталей, що отримали однаковий ранг можуть бути зібрані у довільній послідовності. Якщо дозволяє структура виробничої системи, з метою скорочення тривалості технологічного процесу, завжди розглядається можливість їх паралельної реалізації.

Наступний етап полягає у отриманні множини варіантів складання. Нехай після декомпозиції структури виробу та після проведених етапів ранжування отримано k груп залежних графів з кількістю рангів у кожній групі, рівній r_i ($i = 1, \dots, k$). Кожен граф позначає окрему складальну одиницю. Для формування 1-го варіанту складання виробу у кожній i -й групі у якості ведучих обираються графи 1-го рангу, з яких починається процес збирання.

Для формування 2-го варіанту складання у 1-й залежній групі у якості ведучої обирається складальна одиниця, якій присвоєно 2-й ранг. При цьому у 2, 3, ..., k -й групах ведучими залишаються графи 1-го рангу.

Після перебору усіх рангів у 1-й групі графів, виконується перебір ведучих графів 2-ї групи і так до останньої k -ї групи включно.

Таким чином, загальну кількість варіантів складання виробу можна записати через добуток:

$$K = \prod_{i=1}^k r_i,$$

де k – кількість груп залежних між собою складальних одиниць виробу,

r_i – кількість рангів, визначених для i -ї залежної групи.

Фізично зміна рангу у залежних групах складальних одиниць відповідає вибору нової базової деталі під час збирання виробу. Вибір тієї чи іншої базової деталі впливає на вибір технологічних баз, використання конкретного виду обладнання, точність з'єднань, кількість установок і позицій, тривалість робіт. Таким чином, зміна базової деталі з одного боку призводить до утворення нового варіанту складання, а з іншого – до зміни важливих показників технологічного процесу.

На рис. 5 представлено загальну схему алгоритму синтезу множини варіантів складання, який побудовано на основі розробленого методу.

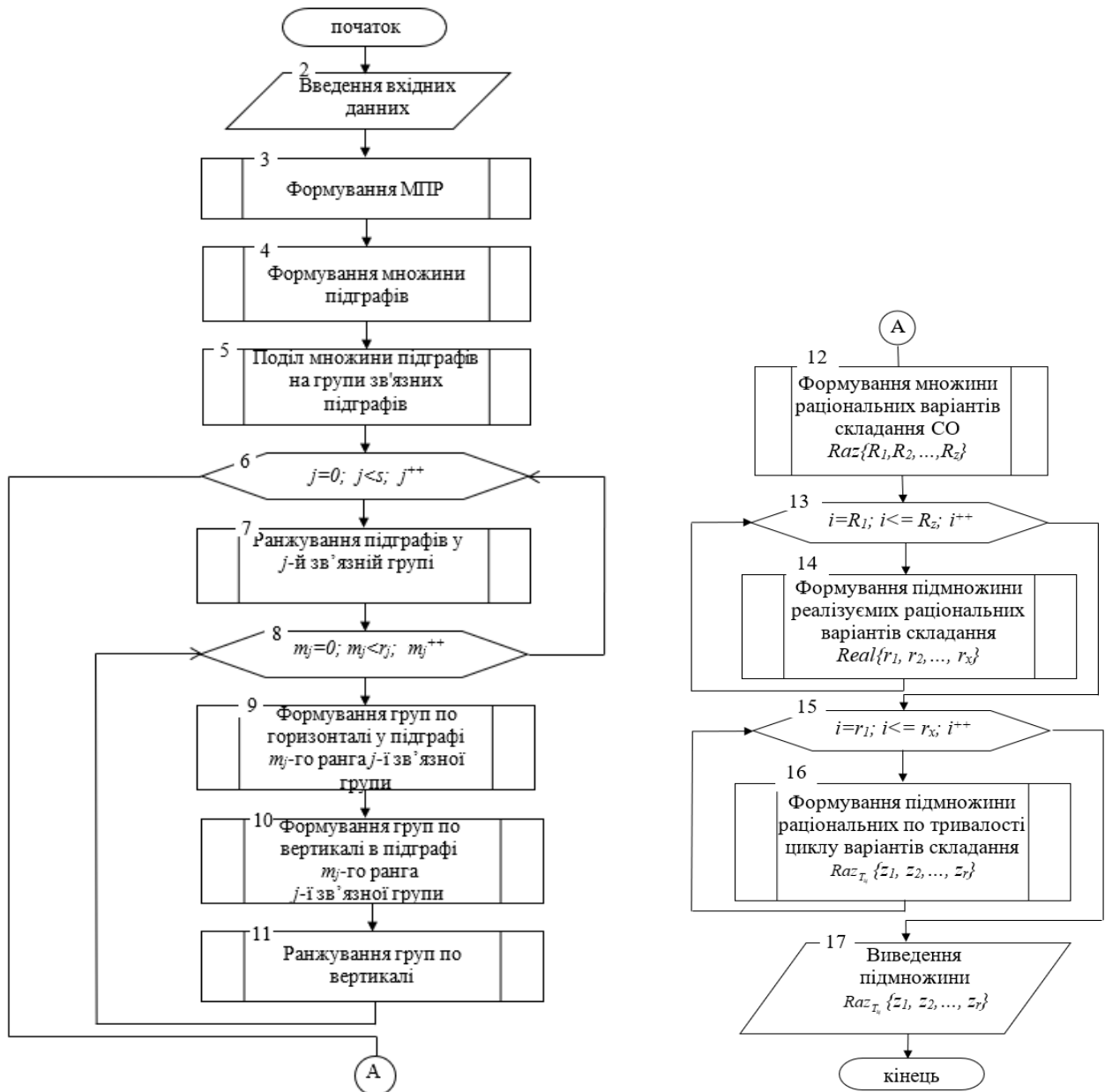


Рисунок 5 – Схема алгоритму синтезу варіантів складання виробу

Раціональними вважаються такі варіанти складання за яких показники технологічного процесу набувають оптимальних значень (блок 12, рис. 5). На практиці серед множини раціональних варіантів обираються ті, що можуть бути реалізовані у заданій виробничій системі за допомогою наявного обладнання (блок 14, рис. 5).

Висновки. В даній роботі розроблено метод, який дозволяє моделювати варіанти складання виробу послідовно з урахуванням розмірних ланцюгів, базування, доступу складальних елементів, екологічних обмежень та ін. технологічних факторів.

У процесі вирішення використовуються математичні моделі, що враховують особливості технологічного процесу та обмежують область пошуку можливих рішень.

Розроблений метод дозволяє отримати множину варіантів складання виробу у відповідності до його конструкторсько-технологічних ознак та технологічних можливостей засобів технологічного оснащення.

Практичне значення результатів роботи полягає в тому, що за розробленим методом реалізовано алгоритм, призначений для програмної реалізації автоматизованого пошуку раціональних варіантів складання.

Розроблений метод враховує особливості структури виробу, подальші дослідження будуть спрямовані на врахування конкретних виробничих умов та на пошук раціональних варіантів складання виробів, виходячи із внутрішніх резервів виробничої системи.

Присвячення і подяка.

Світлій пам'яті доктора технічних наук, професора Захарова Миколи Володимировича [25], який вперше обґрунтував методологічні засади вирішення задачі, що розглядається, автори присвячують цю статтю.



Захаров Микола Володимирович
(1958 - 2006)

Список бібліографічного опису

1. Belov, V., Abramov, D., & Ahmed, R. (2018). Technological Prerequisites for Designing Automated Control System for Technological Process of Production of High-Strength Fine-Grained Concrete on Local Fibrous Basalt Wool Wastes. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–6. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501767>
2. Trofimova, M. S., Panov, A. Y., & Kuznetsov, S. V. (2018). Automated System of Analysis of Reasons and Consequences of Defects of Mechanical Engineering Products. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–5. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501703>
3. Shnyder, D. A., & Kalinina, E. A. (2020). Automated System-Adviser Based on a Model for Control of the Technological Process of Concentrate Production. 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 335–341. <https://doi.org/10.1109/GloSIC50886.2020.9267859>
4. Salah, Y. Ben, Weiguo, L., Sellami, L., Hamida, A. Ben, & Ailing, T. (2022). New and optimal set up for 3D-based stereovision system for manufacturing inspection in 4.0 industry. 2022 6th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ATSIP55956.2022.9805872>
5. Smityuh, Y., Kyshenko, V., Romashchuk, O., & Gorpichenko, A. (2022). Intelligent synergistic control of the technological complex for the sugar factory. 2022 IEEE 11th International Conference on Intelligent Systems (IS), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IS57118.2022.10019728>
6. Burov, O., Lavrov, E., Lytvynova, S., Pinchuk, O., Horska, K., Tkachenko, O., Kovalenko, N., & Chybiriak, Y. (2023). On the way to hybrid intelligence: influence of the human-system interaction rate on the human cognitive performance. <https://doi.org/10.54941/ahfe1002925>
7. Lavrov, E., Siryk, O., Chybiriak, Y., Danilova, L., Nahorni, V., & Vakal, S. (2021). A Model for the Organization of Adaptive Dialogue Interaction “Man-Computer” Taking into Account the Requirements of Reliability and Efficiency. 2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), 31–35. <https://doi.org/10.1109/AICT52120.2021.9628939>
8. Lavrov, E. A., Siryk, O. E., Chybiriak, Y. I., Zolkin, A. L., & Sedova, N. A. (2022). Human-centered management in polyergatic information systems. Multi-criteria distribution of functions between operators. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1049(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012020>
9. E. Lavrov, O. Siryk, I. Kirichenko, N. Barchenko, Y. C. (2021). The Methodology of Managed Functional Networks for Organizing Effective and Adaptive Human-Machine Dialogue in Automated Systems. 428–437.
10. E. Lavrov, Y. Chybiriak, O. Siryk, V. Logvinenko, A. Z. (2022). Training of Specialists for Adaptive management. Techniques for Teaching Computer Analysis of Automated Production Systems in the FlexSim Environment. 106–118.
11. Meyer, F., Hinrichsen, S., & Niggemann, O. (2023). *How to Generate Assembly Instructions with Robotic Process Automation*. <https://doi.org/10.54941/ahfe1004070>
12. Shi, D., Rahimpour, A., Ghafourian, A., Naddaf Shargh, M. M., Upadhyay, D., Lasky, T. A., & Soltani, I. (2023). Deep Bayesian-Assisted Keypoint Detection for Pose Estimation in Assembly Automation. *Sensors*, 23(13), 6107. <https://doi.org/10.3390/s23136107>
13. Sathiyaraj, S., Selvababu, B., Richard E., A., Varghese, A. C., & Vijay P., A. (2023). *Design and fabrication of fixture for automation in cover plate assembly process*. 020111. <https://doi.org/10.1063/5.0111083>
14. Lelyukhin, V., & Kolesnikova, O. (2017). Approach to Determining Order of Production of Parts and Assembly Units

- of Engineering Products in Production Process Planning. *Procedia Engineering*, 206, 1515–1521. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.671>
15. Zeng, W., Jin, Z., Cao, Y., Yi, G., & Li, C. (2023). *Unitized Modelling and Reuse Method of Assembly Process Oriented to Product Family* (pp. 1687–1696). https://doi.org/10.1007/978-981-19-9398-5_102
16. Vaghela, D., Vasudevan, H., & Khavkar, R. (2023). *Improvement in Productivity of Assembly Line by Cycle Time Reduction: A Case Study* (pp. 35–43). https://doi.org/10.1007/978-981-19-7971-2_4
17. Zhang, C., Sun, Q., Sun, W., Shi, Z., & Mu, X. (2023). Performance-oriented digital twin assembly of high-end equipment: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(11–12), 4723–4748. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11457-3>
18. Shabanov, A., Averchenkova, E., & Averchenkov, V. (2022). MODEL AND ALGORITHM FOR CONTROLLING THE ASSEMBLY EQUIPMENT OF MECHANICAL ASSEMBLY SUPPLY SYSTEM. *Automation and Modeling in Design and Management*, 1, 43–55. <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2022-1-43-55>
19. Fang, W., Fu, M., & Zheng, L. (2022). Continuous ergonomic risk perception for manual assembly operations using wearable multi-sensor posture estimation. *Assembly Automation*, 42(2), 209–217. <https://doi.org/10.1108/AA-03-2021-0027>
20. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2023). An Automatic Assembly SMT Production Line Operation Technological Process Simulation Model Development. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(2), 1–9. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.01>
21. Rane, A. B., & Sunnapwar, V. K. (2017). Assembly line performance and modeling. *Journal of Industrial Engineering International*, 13(3), 347–355. <https://doi.org/10.1007/s40092-017-0189-7>
22. Xu, Z.-J., Wang, P., Wang, Q.-H., & Li, J.-R. (2019). Integrating part modeling and assembly modeling from the perspective of process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), 855–878. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1288-9>
23. Rodriguez, I., Nottensteiner, K., Leidner, D., Durner, M., Stulp, F., & Albu-Schaffer, A. (2020). Pattern Recognition for Knowledge Transfer in Robotic Assembly Sequence Planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 3666–3673. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2979622>
24. Ma, L., Gong, J., Xu, H., Chen, H., Zhao, H., Huang, W., & Zhou, G. (2023). Planning Assembly Sequence with Graph Transformer. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 12395–12401. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160424>
25. О. В. Радчук. (2010). Захаров Микола Володимирович. У І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк ... та Я. С. Яцків (Ред.), *Енциклопедія Сучасної України*. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. <https://esu.com.ua/article-15802>

References

1. Belov, V., Abramov, D., & Ahmed, R. (2018). Technological Prerequisites for Designing Automated Control System for Technological Process of Production of High-Strength Fine-Grained Concrete on Local Fibrous Basalt Wool Wastes. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–6. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501767>
2. Trofimova, M. S., Panov, A. Y., & Kuznetsov, S. V. (2018). Automated System of Analysis of Reasons and Consequences of Defects of Mechanical Engineering Products. 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 1–5. <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501703>
3. Shnayder, D. A., & Kalinina, E. A. (2020). Automated System-Adviser Based on a Model for Control of the Technological Process of Concentrate Production. 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 335–341. <https://doi.org/10.1109/GloSIC50886.2020.9267859>
4. Salah, Y. Ben, Weiguo, L., Sellami, L., Hamida, A. Ben, & Ailing, T. (2022). New and optimal set up for 3D-based stereovision system for manufacturing inspection in 4.0 industry. 2022 6th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ATSIP55956.2022.9805872>
5. Smityuh, Y., Kysenko, V., Romashchuk, O., & Gorpichenko, A. (2022). Intelligent synergistic control of the technological complex for the sugar factory. 2022 IEEE 11th International Conference on Intelligent Systems (IS), 1–5. <https://doi.org/10.1109/IS57118.2022.10019728>
6. Burov, O., Lavrov, E., Lytvynova, S., Pinchuk, O., Horska, K., Tkachenko, O., Kovalenko, N., & Chybiriak, Y. (2023). On the way to hybrid intelligence: influence of the human-system interaction rate on the human cognitive performance. <https://doi.org/10.54941/ahfe1002925>
7. Lavrov, E., Siryk, O., Chybiriak, Y., Danilova, L., Nahomyi, V., & Vakal, S. (2021). A Model for the Organization of Adaptive Dialogue Interaction “Man-Computer” Taking into Account the Requirements of Reliability and Efficiency. 2021 IEEE 4th International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), 31–35. <https://doi.org/10.1109/AICT52120.2021.9628939>
8. Lavrov, E. A., Siryk, O. E., Chybiriak, Y. I., Zolkin, A. L., & Sedova, N. A. (2022). Human-centered management in polyergatic information systems. Multi-criteria distribution of functions between operators. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1049(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012020>
9. E. Lavrov, O. Siryk, I. Kirichenko, N. Barchenko, Y. C. (2021). The Methodology of Managed Functional Networks for Organizing Effective and Adaptive Human-Machine Dialogue in Automated Systems. 428–437.
10. E. Lavrov, Y. Chybiriak, O. Siryk, V. Logvinenko, A. Z. (2022). Training of Specialists for Adaptive management. Techniques for Teaching Computer Analysis of Automated Production Systems in the FlexSim Environment. 106–118.
11. Meyer, F., Hinrichsen, S., & Niggemann, O. (2023). *How to Generate Assembly Instructions with Robotic Process Automation*. <https://doi.org/10.54941/ahfe1004070>
12. Shi, D., Rahimpour, A., Ghafourian, A., Naddaf Shargh, M. M., Upadhyay, D., Lasky, T. A., & Soltani, I. (2023). Deep Bayesian-Assisted Keypoint Detection for Pose Estimation in Assembly Automation. *Sensors*, 23(13), 6107. <https://doi.org/10.3390/s23136107>
13. Sathiyaraj, S., Selvababu, B., Richard E., A., Varghese, A. C., & Vijay P., A. (2023). *Design and fabrication of fixture*

- for automation in cover plate assembly process. 020111. <https://doi.org/10.1063/5.0111083>
14. Lelyukhin, V., & Kolesnikova, O. (2017). Approach to Determining Order of Production of Parts and Assembly Units of Engineering Products in Production Process Planning. *Procedia Engineering*, 206, 1515–1521. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.671>
15. Zeng, W., Jin, Z., Cao, Y., Yi, G., & Li, C. (2023). Unitized Modelling and Reuse Method of Assembly Process Oriented to Product Family (pp. 1687–1696). https://doi.org/10.1007/978-981-19-9398-5_102
16. Vaghela, D., Vasudevan, H., & Khavekar, R. (2023). Improvement in Productivity of Assembly Line by Cycle Time Reduction: A Case Study (pp. 35–43). https://doi.org/10.1007/978-981-19-7971-2_4
17. Zhang, C., Sun, Q., Sun, W., Shi, Z., & Mu, X. (2023). Performance-oriented digital twin assembly of high-end equipment: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(11–12), 4723–4748. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11457-3>
18. Shabanov, A., Averchenkova, E., & Averchenkov, V. (2022). MODEL AND ALGORITHM FOR CONTROLLING THE ASSEMBLY EQUIPMENT OF MECHANICAL ASSEMBLY SUPPLY SYSTEM. *Automation and Modeling in Design and Management*, 1, 43–55. <https://doi.org/10.30987/2658-6436-2022-1-43-55>
19. Fang, W., Fu, M., & Zheng, L. (2022). Continuous ergonomic risk perception for manual assembly operations using wearable multi-sensor posture estimation. *Assembly Automation*, 42(2), 209–217. <https://doi.org/10.1108/AA-03-2021-0027>
20. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Starodubcev, N. (2023). An Automatic Assembly SMT Production Line Operation Technological Process Simulation Model Development. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2(2), 1–9. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20230202.01>
21. Rane, A. B., & Sunnapwar, V. K. (2017). Assembly line performance and modeling. *Journal of Industrial Engineering International*, 13(3), 347–355. <https://doi.org/10.1007/s40092-017-0189-7>
22. Xu, Z.-J., Wang, P., Wang, Q.-H., & Li, J.-R. (2019). Integrating part modeling and assembly modeling from the perspective of process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), 855–878. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1288-9>
23. Rodriguez, I., Nottensteiner, K., Leidner, D., Durner, M., Stulp, F., & Albu-Schaffer, A. (2020). Pattern Recognition for Knowledge Transfer in Robotic Assembly Sequence Planning. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 3666–3673. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2979622>
24. Ma, L., Gong, J., Xu, H., Chen, H., Zhao, H., Huang, W., & Zhou, G. (2023). Planning Assembly Sequence with Graph Transformer. *2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 12395–12401. <https://doi.org/10.1109/ICRA48891.2023.10160424>
25. O. V. Radchuk. (2010). Mykola Volodymyrovych Zakharov. In I. M. Dzyuba, A. I. Zhukovsky, M. G. Zheleznyak ... and I. S. Yatskiv (Eds.), *Encyclopedia of Modern Ukraine*. Institute of Encyclopedic Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. <https://esu.com.ua/article-15802>