

**ЮРКОВЕЦЬ В.І., ВИСЛОУХ С.П., АНТОНЮК В.С.**

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ СКЛАДАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Для забезпечення надійності і точності виробів представлено метод автоматизованої побудови послідовності складання високоточних вісесиметричних виробів. Метою роботи є перевірка прийнятності використання орієнтованого графа складання, що включає матриці суміжності та інцидентності, для структурування та планування теоретичної схематизації технологічного процесу складання. Розглянутий метод збігається з можливою математичною реалізацією задачі. Оцінено специфіку конструкційного моделювання та процесу складання математичними методами. Розглянуто техніку створення графіків, що відображає взаємозв'язок між деталями та процесом складання. Вирішення задачі автоматизованого процесу складання виконується за допомогою алгоритмів та обчислювального програмного забезпечення на основі графіків, побудованих у матричному вигляді. Досягнуті результати дають можливість в режимі реального часу коригувати послідовність складання виробів, на основі чого з'являється можливість відстежувати параметри та контролювати прийняття рішень при плануванні процесів складання.

**Ключові слова:** математичне моделювання, вісесиметричні деталі, автоматизація складання, схематизація процесу складання, матриці суміжності і інцидентцій.

**YURKOVETS V.I., VISLOUKH S.P., ANTONYUK V.S.**

### **THE ASSEMBLY SEQUENCE OF AXISYMMETRIC DETAILS SIMULATION**

To ensure the reliability and accuracy of products, an automated construction method for the assembly sequence of high-precision axisymmetric products is presented. The work purpose is to verify the acceptability of using an oriented assembly graph, which includes adjacency and incidence matrices, for structuring and planning the theoretical schematization of the assembly technological process. The considered method coincides with a possible mathematical implementation of the problem. The specifics of structural modeling and the assembly process using mathematical methods were assessed. The technique of creating graphs reflecting the relationship between details and the assembly process is considered. Solving the tasks of the automated assembly process is performed using algorithms and computer software based on graphs constructed in matrix form. The achieved results make it possible to adjust the sequence of products assembly in real-time mode, based on which it becomes possible to monitor parameters and control decision-making when planning assembly processes.

**Keywords:** mathematical modeling, axisymmetric parts, automation of assembly, schematization of the assembly process, adjacency and incidence matrices.

**Вступ.** Проектування технологічного процесу складання виробів включає два етапи [1]. Перший етап – це генерація складальної схеми та технологічного процесу складання, що містить інформацію про порядок кріплення елементів виробу, комплектність складальних одиниць та монтажного з'єднання. Другий етап – це генерація операцій, визначення складу елементів, що приєднуються, видів робіт, інструментів та інших параметрів, що формують опис складальних операцій. Найбільш трудомістким і складним для формалізації є творчий процес формування схеми складання та технологічного процесу складання, під час якого інженер визначає технологічні складальні одиниці та визначає можливий порядок складання. Дана робота, вважається першим етапом проектування технології складання.

При проектуванні технології складання використовується теорія графів, що дозволяє пов'язати теоретичні принципи з конкретними обчислювальними алгоритмами, які легко реалізуються на комп'ютері. Основоположником застосування математичної моделі як форми графа в інженерії є Б.С. Мордвінов [2], який ввів поняття взаємопов'язаної геометричної структури машини та її графіка. Сюди відноситься, зокрема, проблема послідовності складання виробів. J. Yu та L. Xu розробили підхід до автоматичної розробки послідовності складання на основі методу матриці зв'язків покомпонентно [3]. Р. Готтіполу та К. Гош запропонували підхід до створення виконуваної послідовності складання на основі аналізу обмежень контакту та мобільності [4]. К. Су розробив систематичний метод аналізу геометричних обмежень між складальними одиницями на основі інтерактивного моделювання САД-моделей [5]. Альфадлані Т., Самадхі М.А., Тоха І. [6] розробили автоматичний метод виявлення зіткнення між складальними одиницями. Цей метод заснований на геометричній інформації, отриманій шляхом спарювання складальних одиниць. Кантабабу М., Гірі Р. [7] запропонували підхід до генерації послідовності розбирання механічних моделей на основі матриці інтерференції та графа з'єднань. На основі матриці інтерференції М. Р. Бахубалендруні, Б.Б. Бісвал реалізували інтегровані методи, засновані на теорії, що використовується для вилучення критеріїв предикатів, таких як передача даних [8, 9], механічна здійсненність [10-12] і геометрична здійсненність [13] для створення оптимального ASP/DSP (проектування послідовності складання/демонтажу) [14].

**Метою роботи** є визначення послідовності з'єднання деталей при складанні виробів на основі матриць суміжності та частоти. В роботі розглядаються як об'єкт складання розглядаються вісесиметричні деталі. При побудові процесу складання слід мати на увазі, що процес складання – це процес формування зв'язків між деталями.

Тому спочатку необхідно ідентифікувати дані зв'язки, що можливо на основі використання математичної моделі виробу у вигляді графа, де частини є вершинами, а зв'язки – ребрами. Після визначення послідовності утворення зв'язків, яка ідентифікована в конструкції складальної одиниці, це вирішує задачу визначення послідовності складання виробу. Граф зв'язку між частинами вузла може бути представлений у вигляді матриці суміжності (графа), а послідовність, що утворює зв'язки, може бути представлена як матриця інцидентцій цього графа, в якій послідовність стовпців, іншими словами, ребра визначатиме послідовність складання. Тому задачею даного дослідження є розробка методології побудови та впорядкування матриці інцидентів графів

**Результати дослідження** Методологія побудови та впорядкування матриці інцидентності графа реалізується в такій послідовності:

- побудова геометричної моделі складальної одиниці (виробу);
- визначення контактів і силового замикання. Під контактом розуміють з'єднання деталей, що безпосередньо торкаються площинних або циліндричних поверхонь або дозволяють розташовувати третю частину між ними;
- ідентифікація для кожної частини зв'язку з іншими частинами з побудовою матриці суміжності;
- упорядкування деталей, складання моделі конструкції складальної одиниці (на основі матриці графіка суміжності);
- побудова графіку з ребрами-зв'язками та додаванням ребер силового замикання для моделі побудови складальної одиниці;
- визначення правил послідовності складання для ділянок, обмежених силовим замиканням;
- побудова початкової, неупорядкованої матриці інцидентності з матриці суміжності;
- упорядкування зв'язків у матриці випадків;
- реалізація процесу складання.

При реалізації процесу складання прийнято такі припущення. Під силовим замиканням розуміють з'єднання деталей, що отримане шляхом докладання до них зусиль для забезпечення безперервності контакту, збереження розташування деталі щодо іншої частини відповідно до конструкції складальної одиниці (різьбові з'єднання, з'єднання за допомогою стопорного кільця, з'єднання під натягом тощо).

Також контакт буде вважатися ознакою зчеплення частин, розрив – властивістю силового замикання.

Розглянемо реалізацію методики на прикладі ротора насоса [16] (Рис. 1).

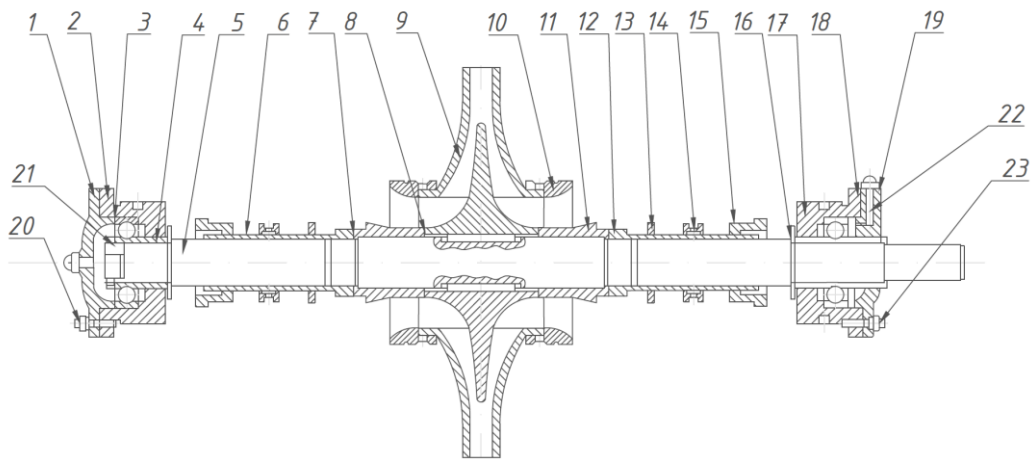


Рис. 1 – Ротор насоса: 1 - кришка підшипника, 2 - склянка підшипника п'яти, 3 – прокладка, 4 – втулка, 5 – вал, 6 - кільце сальника, 7,8 – прокладка, 9 - колесо робоче, 10 - кільце ущільнюоче, 11 - втулка напрямна, 12 - захисна втулка, 13 – сальниковий ущільнювач, 14 - кільце сальника, 15 - кришка сальника, 16 – відбійник, 17 - склянка підшипника, 18 – прокладка, 19 - кришка підшипника, 20 - болт, 21 – гайка, 22, 23 - болт

Для виконання моделювання конструкції вузла «Ротор насоса» необхідно перейти до моделі вузла у вигляді його геометричної моделі, в якій усі деталі мають лише площинні та циліндричні поверхні (Рис. 2).

При цьому трансформуємо форму деяких деталей, замінюючи конічні, сферичні, різьбові, фасонні поверхні на плоскі та циліндричні.

Математичне моделювання здійснюємо на основі спрощеної моделі у вигляді графіка, що враховує зв'язки тільки в одному – осьовому напрямку (між торцевими поверхнями деталей).

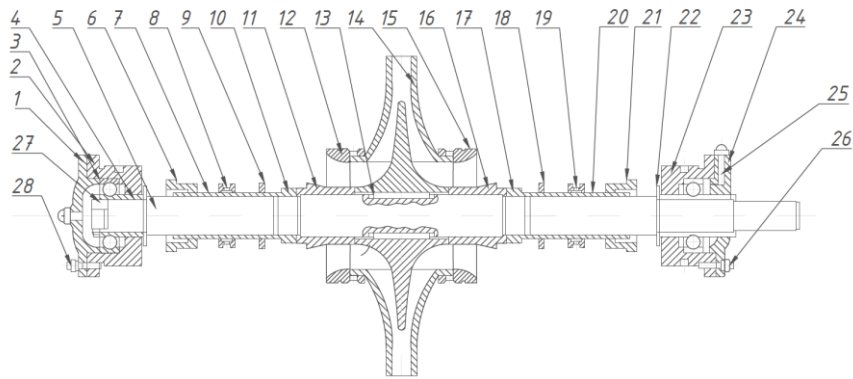


Рис. 2 – Геометрична модель конструкції вузла «Ротор насоса»

За вершини графа взято деталі, а за ребра графа – зв'язки між деталями. Під зв'язками розуміють безпосередній контакт між деталями, певна щілина або обмеження щодо взаємного розташування деталей у складальній одиниці.

В якості номера зв'язку вкажемо номери частин, з якими пов'язана ця частина (Рис. 3). Якщо є контакт між деталями, то визнається напрямок від розглянутої частини до сполучної – вправо або ліво, в залежності від того, розташована сполучна частина праворуч чи ліворуч, обмежуючи зміщення розглянутої деталі.

Тип зв'язку визначається рангом:

1 – безпосереднє з'єднання (контакт при складанні) – можна з'єднати без використання інших деталей – міцне з'єднання;

2 – з'єднання можливе тільки після попереднього складання інших деталей (є контакт) – слабе з'єднання;

3 – зв'язок вказує на взаємне розташування деталей у складальній одиниці без прямого контакту або заборону на неможливі положення.

Поруч із номером зв'язку вказується його ранг, що відокремлений від номера рангу точкою.

Надалі виконують ідентифікацію для кожної частини зв'язку 1-го і 2-го рангів з побудовою матриці суміжності. При цьому зв'язки 1-го і 2-го рангу є лише контактами – згідно з контактним графіком (там буде на одну менше, ніж кількість частин), тобто розпочати потрібно з визначення контактів, в результаті слід отримати дерево зв'язків (контакти) між частинами (Рис. 4).

Створення моделі складальної одиниці виконується на основі матриці суміжності.

При цьому процес упорядкування деталей полягає в побудові рядків і відповідних стовпців таким чином, що від'ємні числа розміщуються зверху головної діагоналі, додатні числа – знизу, а числа, рівні 1, ближче до головної діагоналі, завдяки вилученню чисел. дорівнює 2 від головної діагоналі.

В результаті цього отримуємо розташування деталей у моделі конструкції складальної одиниці (Табл. 1).

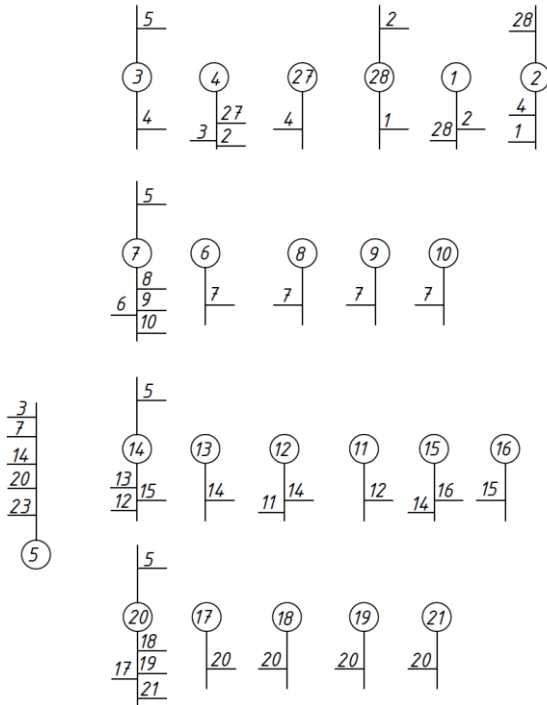


Рис. 3 – Позначення напрямків і ранг зв'язків між деталями в моделі конструкції складальної одиниці

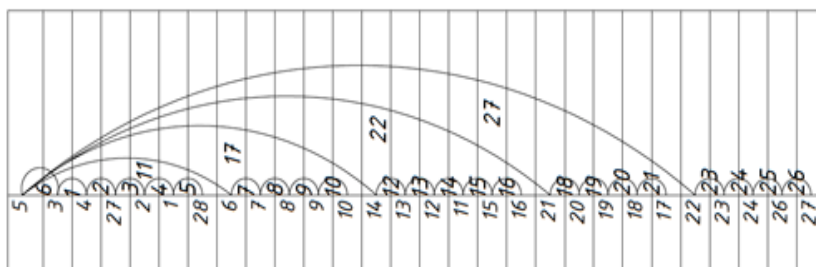
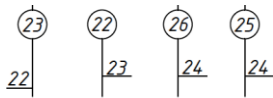


Рис. 4 – Послідовність складання за контактним графіком

Таблиця 1 – Матриця суміжності (результат упорядкування)

N	5	3	4	27	2	1	28	6	7	8	9	10	14	13	12	11	15	16	21	20	19	18	17	22	23	24	26	25
5	0	-1	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	-2	0	0	0	0	-2	0	0	0	0
3	1	0	-1	-2	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	2	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	2	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	2	0	0	2	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-2	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-2	-2	-2	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	-2	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	0	-1	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
22	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-2	-2	-2	-2
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	-1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	-1
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0

На рисунку 5 наказано побудований графік з ребрами-контактами та з додаванням ребер силового замикання. Тут також враховано силові контакти – різьбою (болти, гвинти) для замикання ланцюгів, стопорним кільцем.

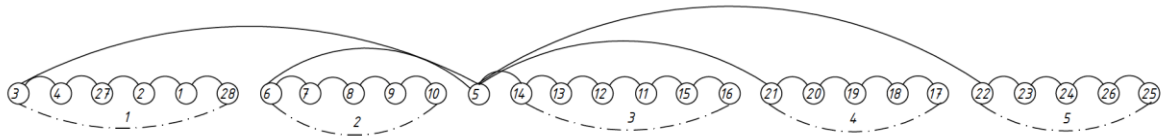


Рис. 5 – Граф-дерево зв'язків (контактів) і силового замикання між деталями (суцільні лінії – контакти, пунктир – силове замикання)

Надалі визначаються правила послідовності складання для ділянок, що обмежені силовим замиканням, та виконується побудова початкової, невпорядкованої матриці інцидентів.

При цьому кількість стовпців у матриці має бути на 1 менше кількості частин, а кількість зв'язків, визначених для всіх частин, більше, тому що для кожної частини можна вказати зв'язки з усіма іншими частинами, тобто  $n-1$  з'єднання, таким чином,  $(n-1) n/2$ . В матриці вказують всі можливі зв'язки.

Якщо дві частини з'єднані, їх зв'язки з іншими частинами поєднуються і зв'язки цих двох частин з'єднуються з однією частиною. Отже, кількість стовпців у матриці не повинна дорівнювати  $n-1$ , а дорівнювати кількості ідентифікованих зв'язків.

Зв'язки вносяться в матрицю випадків (табл. 2) у порядку, який фіксується в матриці суміжності. Враховуються лише типи зв'язків першого та другого рангу. Зв'язки третього рангу потрібні для побудови вузла, а не для визначення послідовності складання.

Таблиця 2 – Матриця суміжності (невпорядковані зв'язки)

N	5	3	4	27	2	1	28	6	7	8	9	10	14	13	12	11	15	16	21	20	19	18	17	22	23	24	26	25	
5	1																												
3	1	1																											
4		2	1																										
27			2	1																									
2				2	1																								
1					2	1																							
28						1	1																						
6							2	1																					
7								2	1																				
8									2	1																			
9										2	1																		
10											2	1																	
14												2	1																
13													2	1															
12														2	1														
11															2	1													
15																2	1												
16																	2	1											
21																		2	1										
20																			2	1									
19																				2	1								
18																					2	1							
17																						2	1						
22																							2	1					
23																								2	1				
24																									2	1			
26																										2	1		
25																												2	1





внести необхідні зміни в послідовність складання, на основі яких стає можливим контролювати дані та рішення при аналізі розмірів конструкцій і при проектуванні складальних процесів.

#### Список літератури

1. Якімов О.В., Марчук В.І., Дінчевський П.А., Якімов О.О., Ларшин В.П. Технологія машино- та приладобудування. Підручник. – Луцьк. Редакційно-аналітичний відділ ЛДТУ, 2005. – 712 с.
2. Мордвинов Б.С. Исследование геометрических структур с использованием методов теории графов. // Известия вузов. Машиностроение. No 3. 1965. С. 111–118
3. Yu J., Xu L. D., Bi Z. [et al.]. Extended interference matrices for exploded view of assembly planning. // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2014. Vol. 11, Issue 1. P. 279–286. DOI: 10.1109/TASE.2012.2235144
4. Gottipolu R. B., Ghosh K. A simplified and efficient representation for evaluation and selection of assembly sequences // Computers in Industry. 2003. Vol. 50. P. 251–264
5. Su Q. Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33, Issue 1. P. 48–57
6. Alfidhiani T., Samadhi A. M., Toha I. Automatic collision detection for assembly sequence planning using a three-dimensional solid model. // Journal of Advanced Manufacturing Systems. 2011. Vol. 10, Issue 02. P. 277–291. DOI: 10.1142/S021968671100220X
7. Giri R., Kanthababu M. Generating complete disassembly sequences by utilising two-dimensional views // International Journal of Production Research. 2015. Vol. 35, Issue 2. P. 5118–5138. DOI: 10.1080/00207543.2015.1005249
9. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. A note on mechanical feasibility predicate for robotic assembly sequence generation // CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future: Proceedings of the 28th International Conference on CARs & FoF. 2016. P. 397–404. DOI: 10.1007/978-81-322-2740-3\_38
10. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. Liaison concatenation-A method to obtain feasible assembly sequences from 3D-CAD product // Sadhana. 2016. Vol. 41, Issue 1. P. 67–74. DOI: 10.1007/s12046-015-0453-8
11. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. A review on assembly sequence generation and its automation // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 230, Issue 5. P. 824–838
12. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. Influence of assembly predicate consideration on optimal assembly sequence generation // Assembly Automation. 2015. Vol. 35, Issue 4. P. 309–316
13. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. An intelligent approach towards optimal assembly sequence generation. // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 232, Issue 4. P. 531–541
14. Viganò R., Osorio Gómez G. Automatic assembly sequence exploration without precedence definition // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. 2013. Vol. 7, Issue 2. P. 79–89. DOI: 10.1007/s12008-012-0165-9

#### References (transliterated)

1. Yakimov O.V., Marchuk V.I., Dinchevskiy P.A., Yakimov O.O. Larshyn V.P. Tekhnolohiia mashyno- ta prykladobuduvannia. Pidruchnyk. – Lutsk. Redaktsiino-analitychnyi viddil LDTU, 2005. – 712 s.
2. Mordevynov B.S. Yssledovanye heometrycheskykh struktur s yspolzovanyem metodov teoryy hrafov. // Yzvestyia vuzov. Mashynostroenye. No 3. 1965. S. 111–118
3. Yu J., Xu L. D., Bi Z. [et al.]. Extended interference matrices for exploded view of assembly planning. // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2014. Vol. 11, Issue 1. P. 279–286. DOI: 10.1109/TASE.2012.2235144
4. Gottipolu R. B., Ghosh K. A simplified and efficient representation for evaluation and selection of assembly sequences // Computers in Industry. 2003. Vol. 50. P. 251–264
5. Su Q. Computer aided geometric feasible assembly sequence planning and optimizing. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33, Issue 1. P. 48–57
6. Alfidhiani T., Samadhi A. M., Toha I. Automatic collision detection for assembly sequence planning using a three-dimensional solid model. // Journal of Advanced Manufacturing Systems. 2011. Vol. 10, Issue 02. P. 277–291. DOI: 10.1142/S021968671100220X
7. Giri R., Kanthababu M. Generating complete disassembly sequences by utilising two-dimensional views // International Journal of Production Research. 2015. Vol. 35, Issue 2. P. 5118–5138. DOI: 10.1080/00207543.2015.1005249
9. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. A note on mechanical feasibility predicate for robotic assembly sequence generation // CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future: Proceedings of the 28th International Conference on CARs & FoF. 2016. P. 397–404. DOI: 10.1007/978-81-322-2740-3\_38
10. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. Liaison concatenation-A method to obtain feasible assembly sequences from 3D-CAD product // Sadhana. 2016. Vol. 41, Issue 1. P. 67–74. DOI: 10.1007/s12046-015-0453-8
11. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. A review on assembly sequence generation and its automation // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 230, Issue 5. P. 824–838
12. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B., Kumar M. [et al.]. Influence of assembly predicate consideration on optimal assembly sequence generation // Assembly Automation. 2015. Vol. 35, Issue 4. P. 309–316
13. Bahubalendruni M. R., Biswal B. B. An intelligent approach towards optimal assembly sequence generation. // Proceeding of Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 232, Issue 4. P. 531–541
14. Viganò R., Osorio Gómez G. Automatic assembly sequence exploration without precedence definition // International Journal on Interactive Design and Manufacturing. 2013. Vol. 7, Issue 2. P. 79–89. DOI: 10.1007/s12008-012-0165-9

Поступила (received) 03.04.2022

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Юрковець Василь Ігоревич (Yurkovets Vasyl Igorevych)** – аспірант кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8434-5801>; e-mail: [yurkovec.v@gmail.com](mailto:yurkovec.v@gmail.com)

**Вислоух Сергій Петрович (Vysloukh Sergiy Petrovych)** – кандидат технічних наук, доцент кафедри кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2204-2602>; e-mail: [vsp1@ukr.net](mailto:vsp1@ukr.net)

**Антонюк Віктор Степанович (Antonyuk Viktor Stepanovych)** – доктор технічних наук, завідувач кафедри, професор кафедри виробництва приладів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0690-2411>; e-mail: [victor.antoniuk@gmail.com](mailto:victor.antoniuk@gmail.com)