

Ю.В. Лашина, аспір.
В.А. Пасічник, к.т.н., доц.

Національний технічний університет України «КПІ»

ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ВИРОБУ З ТОЧКИ ЗОРУ СКЛАДАННЯ ШЛЯХОМ ФОРМАЛІЗОВАНОГО СКОРОЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ДЕТАЛЕЙ

Представлено сучасні напрямки підвищення технологічності складання виробів (DFA). Показано, що частина задач DFA може бути формалізована і передана від людини комп'ютеру. Запропоновано новий алгоритм цілеспрямованого пошуку деталей, що можуть бути об'єднані без зменшення функціональності складального виробу. Застосування алгоритму проілюстровано прикладом.

Постановка задачі в загальному вигляді та її актуальність. Сучасний підхід до проектування та виробництва конкурентноспроможної продукції полягає у використанні обчислювальної техніки та інформаційних технологій на усіх етапах життєвого циклу виробу. У машинобудівній галузі на сьогоднішній день успішно реалізовані такі засоби автоматизації виробництва: проектування виробу (CAD, CAE), проектування керуючих програм для верстатів з ЧПК (CAM) і планування виробництва (CAPP). Проте, засоби автоматизації проектування технологічних процесів (CAPE – *Computer Aided Production Engineering*), в тому числі й складання, не набули значного розвитку через складнощі, які виникають при формалізації представлення елементів та процесів. Разом з тим існує можливість скорочення вартості виробу завдяки підвищенню його технологічності, зокрема з точки зору складання (DFA).

Аналіз існуючих рішень в області автоматизації DFA. Відомі три методи DFA: *Hitachi Assemblability Evaluation Method*, *Boothroyd Dewhurst System*, *Lucas DFA Technique*, на базі яких реалізовані експертні системи *Design for Assembly 9.2 (Boothroyd Dewhurst System)* [1] та *TeamSET Software (Lucas DFA Technique)* [2]. Проте навіть для цих, найкращих в даному напрямку систем, характерним є низький рівень автоматизації, зокрема те, що майже усі початкові дані вводяться користувачем вручну, а обробка результатів виконується людиною. Тому актуальною задачею є розробка системи DFA, для якої існує можливість інтеграції з іншими системами підтримки життєвого циклу виробу.

Метою проведених досліджень є розробка процедур формалізованого DFA.

Викладення основного матеріалу досліджень. Проблема автоматизованого аналізу конструкції, спрямованого на підвищення її технологічності, з точки зору складання, потребує вирішення кількох завдань, серед них:

- 1) визначення типу вхідних даних та їх автоматичне отримання;
- 2) визначення критеріїв та показників складності конструкції;
- 3) створення алгоритмів автоматизованого аналізу *складальної одиниці (CO)*.

Виокремлюють такі *типи вхідних даних*.

Дані, що можуть бути безпосередньо отримані з CAD: розмірно масові характеристики, матеріал, інформація про вільні поверхні доступу та ін.

Інформація про обмеження рухливості деталей. В роботі [3] представлено автоматизовану систему *Extrass*, яка дозволяє отримати необхідну інформацію для побудови матриць/графів обмежень рухливості деталей з системи тривимірного моделювання *SolidEdge*.

Інформація про кінематику механізму та наявність рухомих з'єднань. На першому етапі може бути отримана з CAD шляхом порівняння розташування систем координат деталей у декількох, як правило двох крайніх, положеннях механізму [4]. Проте необхідно зазначити, що такий підхід потребуватиме доопрацювання у зв'язку з тим, що отримувана інформація залежить від правильності визначення людиною положень механізму, що підлягають аналізу.

Функціональна модель механізму. Відомі рішення, що базуються на побудові діаграм зміни станів [5]. Проте, на наш погляд, у зв'язку зі складністю формалізації даних, необхідних для побудови функціональної моделі, це питання залишається відкритим для дослідження.

Технологічно доцільна послідовність складання. Може бути використана як допоміжна інформація, але не як базова, тому що зміна конструкції може призвести до зміни послідовності складання. Визначається згідно з методом «зворотного синтезу» [6], виходячи з умови доступу деталей в зону складання.

Критерії та показники складності конструкції мають бути визначені для порівняння трудомісткості процесу складання різних варіантів конструктивного виконання функціональної моделі виробу. В даній роботі прийнято, що зменшення кількості деталей у виробі обов'язково призведе до

спрощення процесу складання (скорочення часу складання, зменшення номенклатури обладнання тощо). Крім того, зменшення складності конструкції можна досягти за рахунок використання накопиченого у виробництві досвіду. Таким чином, DFA може виконуватись за трьома напрямками [4]:

- скорочення кількості деталей шляхом поєднання декількох деталей в одну;
- спрощення конструкції шляхом заміни з'єднань;
- підвищення технологічності окремих деталей та всієї конструкції.

Далі розглянемо ці напрямки більш детально.

Скорочення кількості деталей складальної одиниці шляхом поєднання декількох деталей в одну. Зазначимо, що між наведеними напрямками DFA не існує чіткої межі, вони можуть виконуватись як одночасно, так і послідовно або окремо, проте існують вимоги, що обов'язково повинні враховуватись при прийнятті рішень щодо переконструювання виробу під час проведення DFA аналізу конструкції (табл. 1).

Таблиця 1

Вимоги, що враховуються при DFA аналізі

| Можуть аналізуватись комп'ютером | Аналізуються людиною |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Технологічні вимоги</i> | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Можливість реалізації послідовності складання. • Доступ інструменту в зону складання | <ul style="list-style-type: none"> • Можливість виконання деталей з одного матеріалу. • Можливість та економічна доцільність виготовлення об'єднаної деталі |
| <i>Функціональні вимоги</i> | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Відсутність відносного руху між деталями в процесі роботи механізму | <ul style="list-style-type: none"> • Незмінність передачі механізмом сил, моментів, швидкостей. • Деталі, що потребують регулярної заміни або налаштування, не повинні об'єднуватись з іншими |

Існують випадки, коли підвищення технологічності конструкції виробу можна досягти простим об'єднанням декількох деталей в одну [7], без суттєвої зміни їх форми, що є найпростішою формою DFA аналізу. Алгоритм цілеспрямованого пошуку деталей, що можуть бути об'єднані без зміни конструкції, представлений на рис. 1.

У процесі роботи алгоритму виконується аналіз кожної пари деталей у СО. На основі *бінарних відношень обмежень рухливості* (БВОР) [8] робиться висновок про наявність контакту між деталями: якщо елемент $d_{i,j} = 1$ хоча б в одному напрямку, то деталі контактують. На основі аналізу взаємного розташування пари деталей у двох крайніх робочих положеннях механізму визначається, чи можливий відносний рух між деталями в процесі роботи механізму. Якщо так, то об'єднувати ці деталі не можна, оскільки це призведе до порушення кінематики СО.

Якщо деталі не виконують відносного руху в процесі роботи механізму, аналізується матеріал деталей. Якщо він однаковий, деталі можна поєднувати, якщо ні, – користувач вирішує, чи можна використовувати для деталей a_i та a_j однаковий матеріал.

Необхідно зазначити, що під час роботи алгоритму може виникнути ситуація, коли декілька деталей можуть бути поєднані з a_i , для прийняття рішення в такому випадку введено додаткову змінну e – номер деталі, що має бути об'єднана з a_i , на початку роботи алгоритму $e = 0$. На даному етапі оцінка варіантів виконується користувачем. Коли $j > N$, аналізується значення змінної e , якщо воно не дорівнює нулю, деталі a_i та a_e об'єднуються.

Алгоритм припиняє роботу, якщо проаналізовані усі пари деталей у складанні.

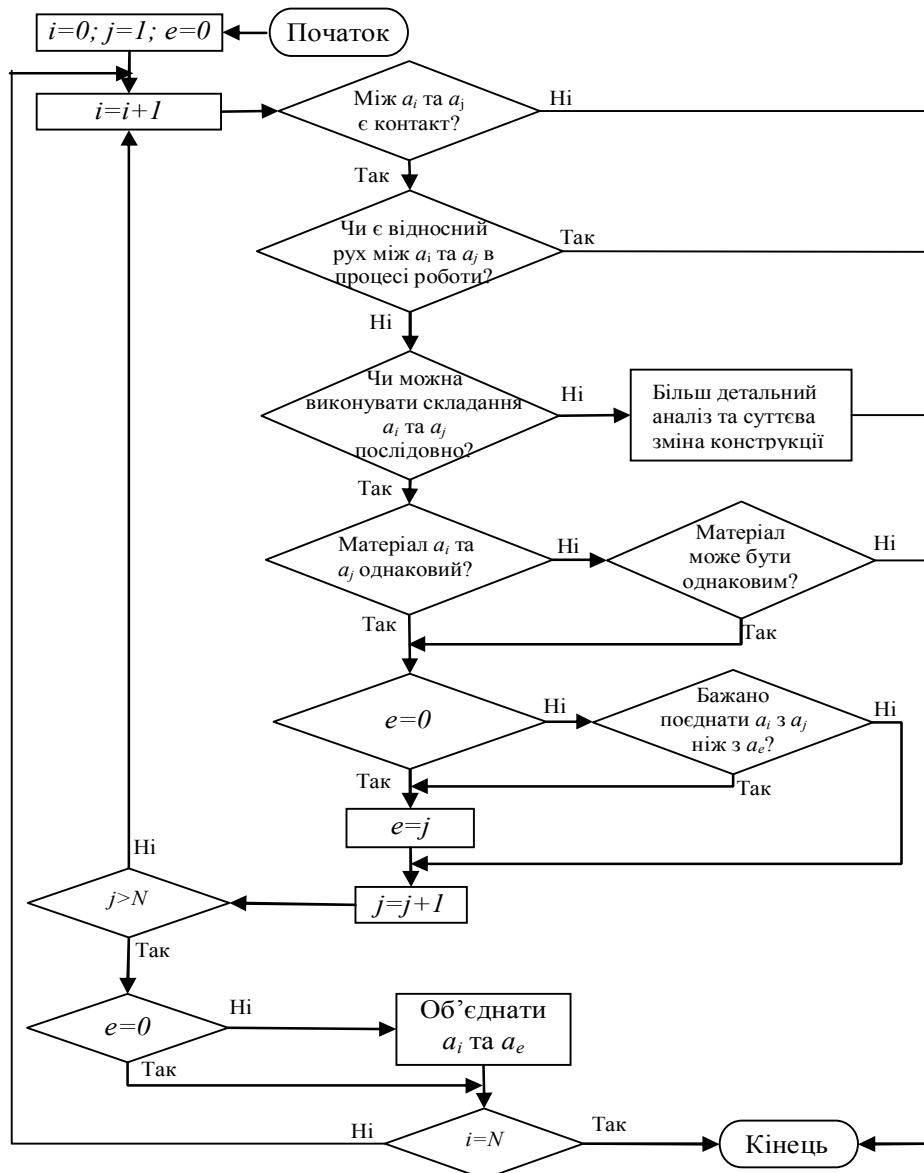


Рис. 1. Алгоритм цілеспрямованого пошуку деталей, що можуть бути об'єднані без зменшення функціональності

Спрощення конструкції шляхом заміни з'єднань. Відомі чисельні рекомендації щодо технологічності виконання як самих деталей, так і їх з'єднань, можуть бути поєднані в базу даних. Реалізація DFA аналізу СО зводиться до пропонування конструктору кращого варіанта замість нераціональної конструкції. Такий підхід є основним в експертних системах, що підтримують DFA [9]. Такий аналіз може виконуватись і під час розробки конструкції і, навіть, на стадії концептуального проектування.

Підвищення технологічності з'єднання виконується за такими напрямками:

1. Зменшення кількості з'єднань в конструкції, що для своєї реалізації потребують більше одиниці обладнання.
2. Спрощення складальних рухів (наприклад заміна різьби пресовим з'єднанням, пресового з'єднання – з'єднанням, що реалізується пружною деформацією).
3. Зменшення типів та розмірів елементів кріплення.
4. Забезпечення єдиного напрямку орієнтації елементів кріплення.

Рекомендації щодо змін у конструкції з метою спрощення складання [10]:

1. Заміна шпонкового з'єднання шліцьовим.
2. Заміна з'єднання за допомогою шайби з шплінтом або кільця з установочним гвинтом на з'єднання з кріпленням розрізним пружинним кільцем.
3. Заміна кріплення кришки гвинтами на кріплення пружним кільцем або байонетне.
4. Поєднання гвинтів та шайб в одну деталь.

5. Заміна стопоріння болтів, гвинтів та гайок за допомогою обв'язувального дроту, шплінтів та штифтів стопорінням контргайкою, конічною поверхнею гайки, пружинною шайбою, шайбою із зубцями тощо.
6. Заміна заклепкових з'єднань зварними чи клейовими або виключення використання заклепок шляхом створення на одній з деталей спеціальних виступів, на які отворами встановлюють деталі, що приєднуються, після чого виконуються розклепування.

Підвищення технологічності окремих деталей та всієї конструкції. Основними напрямками підвищення технологічності деталей СО, з точки зору складання, є:

1. Введення додаткових конструктивних елементів для забезпечення симетричності деталі.
2. Підсилення асиметрії для асиметричних деталей.
3. Передбачення в конструкції фіксуючих елементів, що забезпечують встановлення деталей та вузлів при складанні.
4. Введення блокувань, що дозволяють складання тільки в необхідному положенні.
5. Підвищення точності усіх деталей. Виключення підбору та пригонки деталей при складанні, забезпечення повної взаємозамінності деталей.

Рекомендації щодо підвищення технологічності СО:

1. Зменшення кількості різносторонніх напрямків встановлення.
2. Зменшення кількості поверхонь з'єднання.
3. Конструювання вузлів у вигляді незалежних агрегатів, що встановлюються у машину в зібраному стані.
4. Зменшення номенклатури матеріалів, що використовуються для виготовлення деталей.

Роботу запропонованого алгоритму (рис. 1) проілюструємо на прикладі СО «Ручка автоматична» (рис. 2).

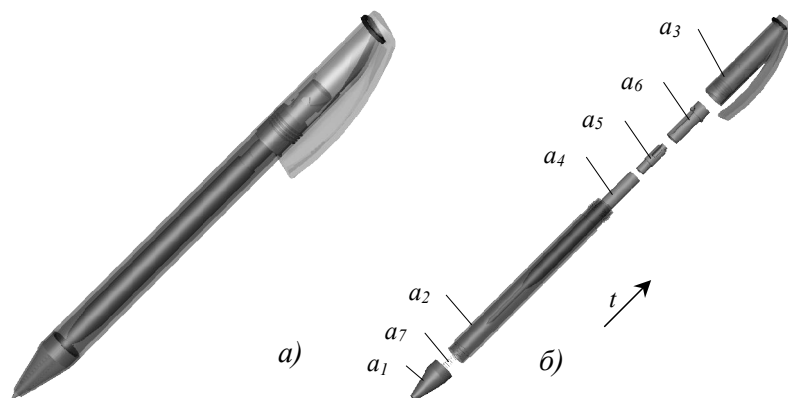


Рис. 2. СО «Ручка автоматична»: а) в зібраному стані; б) в розібраному стані

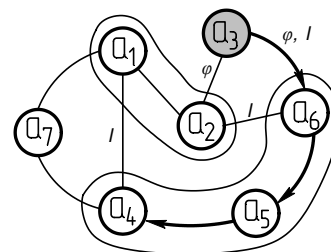


Рис. 3. Граф контактів СО «Ручка автоматична»

Геометричні обмеження БВОР в координатному напрямку t початкової конструкції (рис. 4) показують, що СО містить три з'єднання, що забезпечують цілісність (ЗЗЦ) [8]: $\langle a_1, a_2 \rangle$, $\langle a_2, a_3 \rangle$, $\langle a_4, a_5 \rangle$.

Необхідно зазначити, що перші два ЗЗЦ належать до одного рівня декомпозиції, тому на початковому етапі формулювання послідовності складання необхідно приймати рішення з руйнування якого ЗЗЦ потрібно починати, що призводить до багатоваріантності складання.

Якщо при побудові послідовності розкладання першим було зруйновано ЗЗЦ між a_2 та a_1 , послідовність складання виглядатиме так:

$$a_2 \wedge a_6 \wedge a_3 \wedge a_5 \wedge a_4 \wedge a_7 \wedge a_1$$

Якщо при побудові послідовності розкладання першим було зруйновано ЗЗЦ між a_2 та a_3 , послідовність складання виглядатиме так:

$$a_2 \wedge a_1 \wedge a_7 \wedge a_4 \wedge a_5 \wedge a_6 \wedge a_3$$

Побудуємо об'єднаний граф контактів, ребра якого містять додаткову інформацію про відносний рух між деталями (рис. 3).

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 | a_6 | a_7 |
| a_1 | - | 101 | 000 | 000 | 000 | 000 | 000 |
| a_2 | 111 | - | 101 | 000 | 000 | 000 | 000 |
| a_3 | 010 | 110 | - | 010 | 010 | 011 | 010 |
| a_4 | 010 | 000 | 000 | - | 100 | 000 | 011 |
| a_5 | 010 | 000 | 000 | 111 | - | 000 | 010 |
| a_6 | 010 | 010 | 000 | 010 | 011 | - | 010 |
| a_7 | 011 | 000 | 000 | 000 | 000 | 000 | - |

| | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | a_1 | a_2 | a_3 | a_4 | a_5 | a_6 | a_7 |
| a_1 | - | 101 | 000 | 000 | 000 | 000 | 000 |
| a_2 | 111 | - | 000 | 000 | 000 | 011 | 000 |
| a_3 | 000 | 000 | - | 000 | 000 | 011 | 000 |
| a_4 | 000 | 000 | 000 | - | 100 | 000 | 000 |
| a_5 | 000 | 000 | 000 | 100 | - | 000 | 000 |
| a_6 | 000 | 011 | 010 | 000 | 000 | - | 000 |
| a_7 | 000 | 000 | 000 | 000 | 000 | 000 | - |

Рис. 4. Матриці поступальних (а) і обертальних (б) геометричних БВОР в напрямку t для складальної одиниці «Ручка автоматична»

Згідно з [11], кожному виробу властива наявність ланцюгів потокових зв'язків, тобто послідовності перетворення елементами даного виробу потоку речовини, енергії, сигналу тощо. Для механічних виробів найбільш важливими є: передача зусилля та перетворення напрямку руху. Таким чином, якщо задати нерухому деталь (в даному випадку a_2) та вхідну ланку або «двигун» (в даному випадку a_3), то по графу контактів можна відстежити ланцюг руху (на рис. 3 позначений стрілками) та визначити вихідну ланку (в даному випадку a_4).

Деталі СО можна умовно розділити на три множини:

$S^F : \langle a_1, a_2 \rangle$ – нерухомі деталі;

$S^R : \langle a_3 \rangle$ – деталі, що повертаються на кут φ ;

$S^L : \langle a_4, a_5, a_6 \rangle$ – деталі, що переміщуються на відстань l , до неї належать.

Деталь a_7 зберігає своє положення відносно рухомої деталі a_4 та нерухомої деталі a_1 , тобто в процесі роботи механізму вона деформується. На даному етапі розглядаємо тільки деталі, що не змінюють своєї форми, тому деталь a_7 не відносимо до жодної множини і не аналізуємо.

В межах кожної з множин деталі відповідають двом умовам: вони контактують між собою та не утворюють кінематичні пари. Матеріал усіх деталей виробу – пластмаса, тому вимога можливості виконання деталей з одного матеріалу також виконується. Деталі множини $S^F : \langle a_1, a_2 \rangle$ задовольняють умову реалізації послідовності складання (можливе послідовне складання цих деталей), отже вони можуть бути об'єднані в одну деталь. Множина $S^R : \langle a_3 \rangle$ містить тільки одну деталь, яка залишається окремою. Деталі множини $S^L : \langle a_4, a_5, a_6 \rangle$ також задовольняють умову реалізації послідовності складання, тому можуть бути об'єднані в одну.

Після застосування DFA аналізу, спрямованого на зменшення кількості деталей у конструкції, шляхом об'єднання декількох деталей в одну, для СО «Ручка автоматична» отримано, що виріб може складатися з чотирьох деталей (рис. 5, а). Для нової конструкції, за умови, що за базову прийнято деталь a_1 , існує тільки один варіант складання:

$$a_1 \wedge a_7 \wedge a_4 \wedge a_3$$

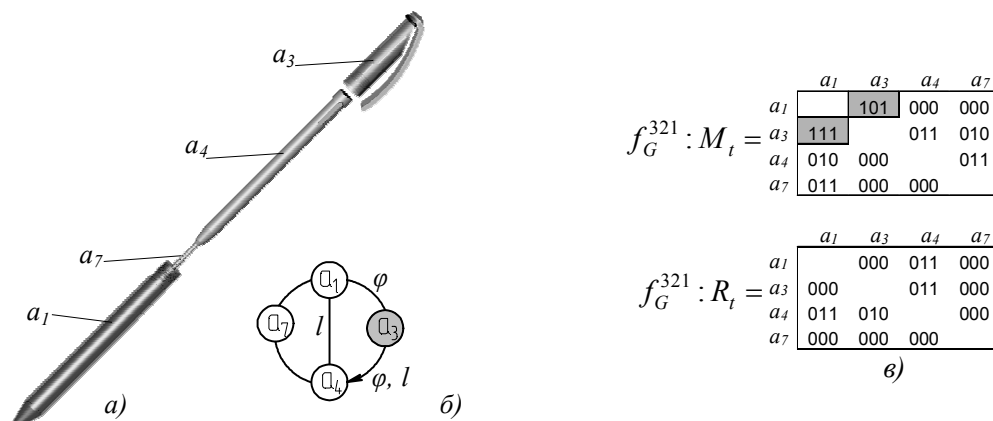


Рис. 5. Результати формалізованого DFA аналізу для СО «Ручка автоматична»:

а) 3D-модель; б) граф контактів з ланцюгами рухів;

в) матриці геометричних БВОР в напрямку t

Висновки. Недостатній, порівняно з CAD/CAE/CAM/CAPP, розвиток систем проектування технології (CAPE) значною мірою стримує наскрізну інформаційну інтеграцію життєвого циклу виробу. Одним з дієвих шляхів підвищення технологічності виробів за рахунок скорочення витрат на складання є метод

DFA, певну частину задач якого можна формалізувати, зокрема показано, що виявлення кінематичних ланцюгів є основою для об'єднання кількох деталей в одну.

Практична перевірка нового алгоритму пошуку деталей, що можуть бути об'єднані без зменшення функціональності виробу, на прикладі СО «Ручка автоматична» довела його правомірність і дозволила: скоротити кількість деталей з 7 до 4; звести багатоваріантне складання до одного варіанта; виключити нетехнологічне різьбове з'єднання.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Boothroyd G.* Product design for manufacture and assembly // Computer Aided Design. – 1994. – Vol. 26. – № 9. – Pp. 505–520.
2. Lucas Engineering Systems Ltd., University Of Hull, Design For Assembly / Manufacture Analysis Practitioners Manual, Version 10.5, CSC Manufacturing, Solihull, UK, 1995.
3. *Сімута Р.Р.* Забезпечення якості і прискорення технологічної підготовки механоскладального виробництва: Дис... канд. техн. наук: 05.02.08. – К.: НТУУ «КПІ», 2003. – 133 с.
4. *Кореньков В.М., Пасечник В.А., Лашина Ю.В.* Процедура целенаправленного DFA-анализа сборочных единиц // Technika i technologia montazu maszyn. – 2008. – С. 81–87.
5. *Wynne Hsu, Jerry Y. H. Fuh, Yunfeng Zhang.* Synthesis of Design Concepts from a Design for Assembly Perspective // Computer Integrated Manufacturing Systems. – 1998. – Vol. 11. – Pp. 1–13.
6. *Давыгора В.Н., Пасечник В.А.* Теория формализованного синтеза исходного множества альтернатив доминирующих порядков последовательно-параллельной сборки // Вестник НТУУ «КПІ». – 2000. – № 39. – С. 55–77.
7. Технологія автоматизованого виробництва: Підручник / О.О. Жолобов, В.А. Крилович, П.П. Мельничук, В.А. Яновський. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 1014 с.
8. *Пасічник В.А., Кореньков В.М.* Принципи формування математичної моделі складальної одиниці у вигляді бінарних відношень обмежень рухливості // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XV международной научно-технической конференции в г. Севастополе; 15–20 сентября 2008 г.: В 4-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – Т. 3. – 316 с.
9. *Barnes C.J., Dagleish G.F., Jared G.E.M., Swift K.G., Tate S.J.* Assembly Sequence Structures in Design For Assembly // Proceedings IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, Marina Del Rey, 1997. – P. 164–169.
10. *Замятин В.К.* Технология и автоматизация сборки: Учебник для машиностроительных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1993. – 464 с.
11. *Половинкин А.И.* Основы инженерного творчества. – М.: Машиностроение, 1988. – 386 с.

ЛАШИНА Юлія Вікторівна – аспірант кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- виділення зв'язків між функціональним призначенням складального виробу, його кінематичною структурою, конструктивним виконанням та процесом складання;
- розробка формалізованих процедур аналізу та синтезу конструкції виробу.

ПАСІЧНИК Віталій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- наукові основи проектування технологічних процесів складання;
- розробка формалізованих процедур аналізу складальних виробів і синтезу проектних рішень технології складання.

Подано 11.11.2008

Лашина Ю.В., Пасічник В.А. Підвищення технологічності виробу з точки зору складання шляхом формалізованого скорочення кількості деталей

Лашина Ю.В., Пасечник В.А. Повышение технологичности изделия с точки зрения сборки путём формализованного сокращения количества деталей

Lashyna Yu.V., Pasichnyk V.A. The Improvement of Product Assemblability by Formalized Reduction of Part Count

УДК 62-112.6:658.512

Повышение технологичности изделия с точки зрения сборки путём формализованного сокращения количества деталей / Ю.В. Лашина, В.А. Пасечник

Представлены современные направления повышения технологичности сборки изделий (DFA). Показано, что некоторые из задач DFA могут быть формализованы и переданы от человека компьютеру. Предложен новый алгоритм целенаправленного поиска деталей, которые могут быть объединены без уменьшения функциональности собираемого изделия. Использование алгоритма продемонстрировано на примере.

УДК 62-112.6:658.512

The Improvement of Product Assemblability by Formalized Reduction of Part Count / Yu.V. Lashyna, V.A. Pasichnyk

This paper presents modern directions of improving the product assemblability. It is shown, that there is the possibility to formalize and computerize some of DFA problems. The new algorithm of purposeful searching parts, which could be a single one, is proposed. The application of algorithm has been demonstrated on an example.