

УДК 658.52.011.56

В.А. Пасічник, д-р техн. наук, Ю.В. Лашина, аспірант  
Національний технічний університет України «КПІ»

## МЕТОД ЦІЛЕСПРЯМОВАНОГО ПЕРЕПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДАЛЬНИХ ВИРОБІВ ТА ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ У «DFA Expert»

*В статті представлено метод пошуку кращого конструктивно-технологічного рішення для изделий механосборочного производства. Данный метод был использован при разработке нового программного обеспечения DFA Expert. Использование в нём существующих математических моделей сборочного изделия и технологического процесса сборки позволило использовать разработанные ранее алгоритмы анализа конструкции, а также реализовать интеграцию DFA Expert с другими системами поддержки жизненного цикла изделий. Использование DFA Expert продемонстрировано на примере сборочной единицы «Пневмораспределитель».*

*This paper presents the method for the purposeful redesign of an assembly. An implementation of the new computer-aided DFA tool named "DFA Expert" is based on this method. An application of the existing assembly model and the assembly process model gives opportunities for realizing computer-aided DFA analysis. There is a possibility of computer-aided generating these models on the basis of the product's 3D model, created in the CAD system. An example of Air Distributor redesign has been included to illustrate the application of DFA Expert.*

Основною метою сучасного підходу до виготовлення продукції, який має назву «Ощадливе виробництво» (*Lean Manufacturing*), є скорочення витрат виробництва, а одним з інструментів реалізації – «Паралельне проектування» (*Concurrent Engineering*), яке передбачає одночасне та взємообумовлене проектування конструкції виробу та виробничих процесів. Метод паралельного проектування, спрямований на скорочення витрат складання виробу за рахунок проектування конструкцій, орієнтованих на складальні процеси, отримав назву «Конструювання, орієнтоване на складання» (*DFA – Design for Assembly*). Цей метод поєднує в собі як набір певних правил та рекомендацій по проектуванню конструкцій нових виробів, так і процедури аналізу існуючих виробів з метою їх перепроєктування.

Проведені дослідження [1] свідчать про те, що машинобудівна продукція містить в середньому 50% «зайвих» деталей, тобто деталей, які можуть бути виключені шляхом перепроєктування, а тому і процеси складання таких виробів виявляються значно дорожчими, аніж це необхідно. Таку ситуацію можна пояснити тим, що на сьогоднішній день DFA аналіз конструкції майже не автоматизовано.

Для успішної автоматизації DFA аналізу необхідно, по-перше, згідно з принципами «Паралельного проектування», реалізувати наскрізну інтеграцію систем інформаційної підтримки життєвого циклу виробу, які пов'язані із складальними процесами, а отже необхідними є математичні моделі об'єктів і процесів складального виробництва та процедури реалізації зв'язку між ними. По-друге, розробити самі процедури автоматизованого DFA аналізу, по-третє, мати надійні засоби оцінки структури витрат на виготовлення певного варіанту конструктивного виконання виробу.

В роботі будемо спиратися на наступні поняття та позначення.

*Складальний виріб* (СВ), спроектований конструктором, являє собою ієрархічно впорядковану множину деталей та *складальних одиниць* (СО) (рис. 1.).

$A_{mn}^k$  –  $n$ -а СО  $k$ -го рівня декомпозиції, що належить  $m$ -й СО ( $k-1$ )-го рівня;  $a_{mn}^k$  –  $n$ -а деталь  $k$ -го рівня декомпозиції, що належить  $m$ -й СО ( $k-1$ )-го рівня.

Будь-який СВ може бути описаний наступним чином,

$$A^0 = A \cup a \quad (1)$$

Таке представлення СВ є початковою інформацією для створення *дерева процесу складання СВ*. Деталі кожного з піддерев дерева, що являє собою конструкторське представлення СВ, впорядковуються згідно *технологічного процесу складання* (ТПС), а в кожному підскладанні виокремлюються базові деталі. Під час синтезу *послідовності складання* (ПС) ієрархія компонентів СВ може бути змінена з метою покращення власне процесу складання. Серед методів автоматизованого синтезу ПС був обраний метод зворотного синтезу [3], який оперує математичною моделлю СВ у вигляді *бінарних відношень обмежень рухливості* (БВОР) [4]. Для опису ТПС нами була розроблена модель у вигляді *матриці послідовності складання* (МПС) та пов'язаного з кожним її елементом *вектору атрибутів* (ВА) [5].

Кожен рядок і стовпчик МПС відповідає абсолютному індексу елемента (деталі або складальної одиниці) у СВ (рис. 2). Елемент МПС  $s_{ij} = T$ , якщо після встановлення елемента  $a_i$  може бути встановлений елемент  $a_j$  в напрямку  $T \in \{X \pm Y \pm Z \pm \dots\}$ , в усіх інших випадках  $s_{ij} = 0$ , тобто:

$$\exists q_n [Hc_n = Hc_{n-1} + a_i] \rightarrow \exists q_{n+1} [a_j \in Hc_{n+1}] \Rightarrow s_{ij} = T, q \in Q, a \in A, Hc \subseteq A \quad (2)$$

де  $q_n$  – стан СВ на  $n$ -му етапі процесу складання, належить множині  $Q$  усіх можливих станів СВ;  $Hc_n$  – склад деталей СВ на  $n$ -му етапі процесу складання, є підмножиною усіх деталей виробу  $A$ .

ВА представляється у вигляді впорядкованої множини операцій, пов'язаних з конкретною деталлю або СО, що містить послідовність технологічних переходів при її встановленні (рис. 2).

$$BA(A_{mn}^k) = \{O_1, O_2, \dots, O_i\} \quad (3)$$

де  $O_i$  – технологічний перехід.

До ТПС, окрім операцій встановлення елементів СВ, входять операції, які виконуються над попередньо встановленими деталями (зварювання, затягування болтів і т.п.). Такі операції не прив'язані до жодного з елементів СВ, а лише мають виконуватись після певних операцій встановлення. Пропонується в дерево процесу складання СВ у якості окремих вузлів додавати псеводеталі (на рис. 3 позначені пунктирною лінією), до яких і будуть прив'язані дані складальні операції. Введемо наступне позначення:  $op_{mn}^k$  –  $n$ -а псеводеталь  $k$ -го рівня декомпозиції, яка належить  $m$ -й СО ( $k-1$ -го рівня). Отже, вираз (1) приймає вигляд,

$$A^0 = A \cup a \cup op \quad (4)$$

Дерево процесу складання СВ може бути використано лише для опису послідовного складання. Для розповсюдження запропонованого представлення ТПС на послідовно-паралельні та паралельні складальні процеси пропонується поряд з деревом процесу складання представляти графічний опис процесу, що враховує виконання операцій у часі (рис. 3).

Сукупність даних про конструкторські та технологічні характеристики виробу назвемо конструкторсько-технологічним рішенням (КТР).

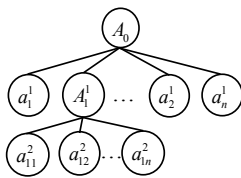
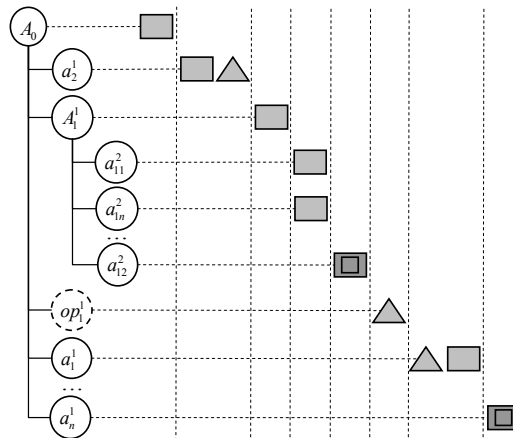


Рис. 1. Конструкторське рішення СВ

$i$	$j$	$a_2^1$	$A_1^1$	$a_1^1$	$a_n^1$	$a_{11}^2$	$a_{1n}^2$	$a_{12}^2$	
$a_2^1$		-	T						■ ▲
$A_1^1$			-	T		T	T		■
$a_1^1$				-	T				■
$a_n^1$					-				■
$a_{11}^2$						-	T		■
$a_{1n}^2$							-	T	▲ ■
$a_{12}^2$								-	■

Рис. 2. Матриця послідовності складання та вектор атрибутів



- - перехід встановлення базової деталі
- - перехід встановлення деталі
- ▲ - перехід, не пов'язаний із встановленням

Рис. 3. Конструкторсько-технологічне рішення

Розглянемо алгоритм автоматизованого пошуку кращого КТР, який було покладено в основу програмного забезпечення *DFA Expert*.

В *DFA Expert* проект містить множину КТР (рис. 4.) та глобальні налаштування для розрахунку економічних показників.

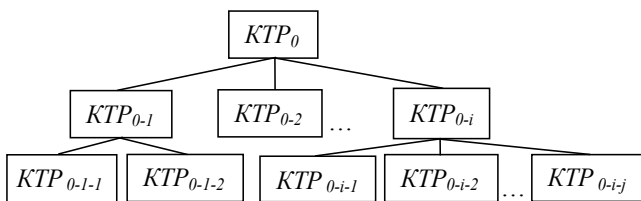


Рис. 4. Структура проекту

Множина КТР описується деревом, коренем якого є базове  $KTR_0$  (початкова конструкція), а вузлами – усі інші КТР, ребра відображають послідовність створення КТР.

Для ребра  $l$ , яке з'єднує два КТР: для КТР, що відповідає вузлу  $n$ -го рівня, «батьківським» будемо називати КТР, що відповідає вузлу  $(n-1)$ -го рівня.

Пропонується наступна послідовність пошуку кращого КТР СВ (рис. 5.).

**Етап 1.** Опис існуючого (базового) КТР.

**1.1.** Формування конструкторської

інформації  $KTR_0^K$ .

Тривимірні моделі СВ, створені в одній з САД-систем, містять наступну інформацію: конструкторська декомпозиція виробу, назва, габаритні розміри, маса, матеріал деталей та СО, певні характеристики: крихкість, гнучкість та ін. Дані інформація може бути отримана в автоматизованому режимі.

**1.2.** Формування технологічної інформації  $KTR_0^T$ .

За допомогою програмного забезпечення *Extrass* [7] на основі тривимірної моделі СВ автоматично може бути згенерована математична модель СВ у вигляді БВОР. Модуль синтезу ПС, використовуючи дану математичну модель та алгоритм, представлений в [5], синтезує МПС, яка імпортується *DFA Expert* у вигляді текстового файлу (рис. 6.). ВА для кожного елемента дерева процесу складання задається в діалоговому режимі в середовищі *DFA Expert*.

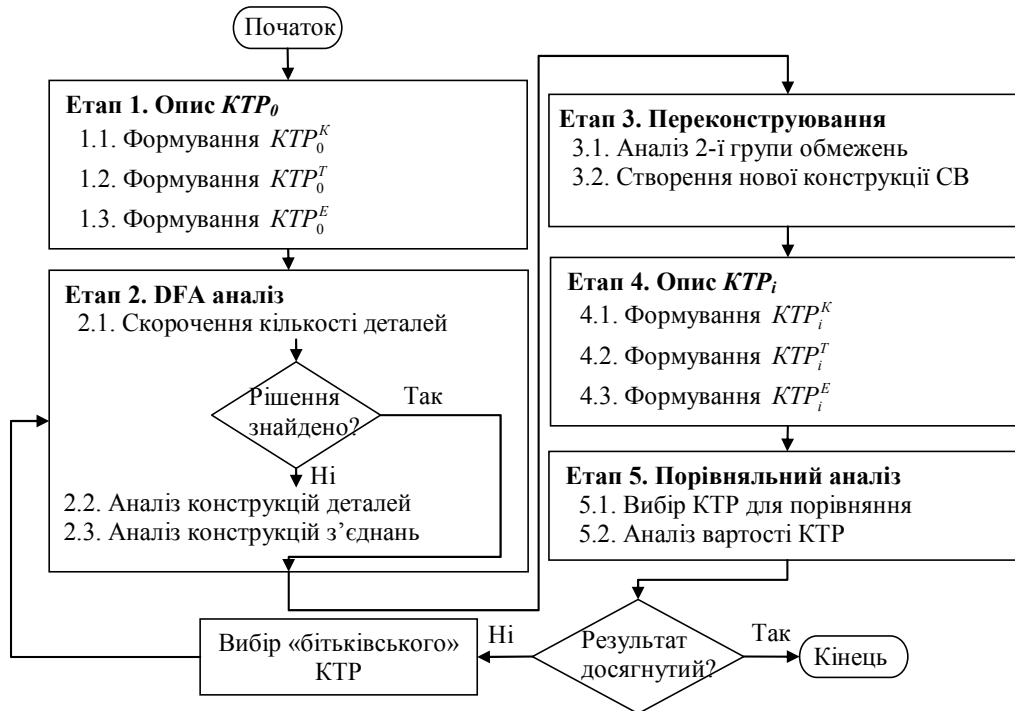


Рис. 5. Алгоритм пошуку кращого КТР

### 1.3. Формування економічної інформації $KTP_0^E$ .

Для успішного переконструювання виробу важливо знати час і вартість кожної складальної операції та переходу, на підставі яких розраховуються часові та вартісні показники кожного КТР.

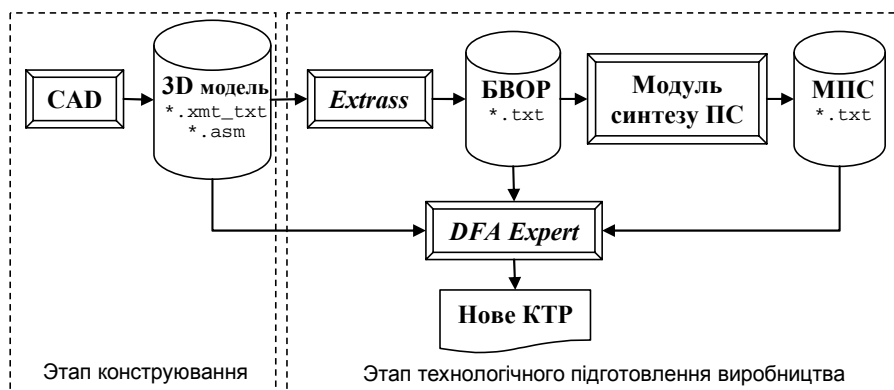


Рис. 6. Взаємодія підсистем проектування виробу та технології

Процес формування інформації про вартість складання виробу реалізований наступним чином: при проектуванні технологічного процесу складання вказується розряд робітника, який виконує певну операцію. Витрати на заробітну платню розраховуються згідно розрядної сітки, заданої у глобальних налаштуваннях програми. Коли сформована необхідна інформація стосовно  $KTP_0$ , виконується етап 2,  $j=0$ .

### Етап 2. DFA аналіз варіанту $KTP_j$

#### 2.1. Скорочення кількості деталей СВ:

Одним з шляхів витрат, пов'язаних з процесом складання, є скорочення кількості деталей у СВ без втрати функціональності і якості виробу. Раніше нами були виділені дві групи обмежень на поєднання деталей: перша – обмеження, аналіз яких може бути автоматизовано; друга – обмеження, які необхідно аналізувати людині [6].

Аналіз першої групи обмежень виконується в два етапи:

2.1.1. Аналіз кінематики СВ, розбиття множини усіх деталей СВ на підмножини, що представляють кінематичні ланки.

2.1.2. Розбиття отриманих множин деталей на підмножини з урахуванням можливості реалізації ПС, доступу інструменту в зону складання та напрямку встановлення.

В результаті отримали множини деталей, які можуть бути об'єднані в одну з урахуванням першої групи обмежень. Якщо такі множини знайдені, переходимо до етапу 3, якщо ні – виконуємо 2.2 та 2.3.

2.2. Аналіз конструкцій деталей з точки зору процесу складання. На даному кроці доцільно звертатися до бази даних конструкторських рішень, орієнтованих на складальні процеси.

2.3. Аналіз з'єднань. На даному кроці необхідно проаналізувати існуючі з'єднання, що забезпечують цілісність [4] та, якщо це можливо, замінити їх більш технологічними з точки зору складання

**Етап 3.** Переконструювання.

3.1. Аналіз другої групи обмежень.

3.2. Прийняття рішення стосовно реконструювання СВ. Створення базової інформації для формування  $KTP_i$ .

**Етап 4.** Опис  $KTP_i$ .

Відрізняється від етапу 1 лише тим, що частина інформації усядкована від «батьківського» КТР.

**Етап 5.** Порівняльний аналіз.

Порівняльний аналіз проводиться з метою знаходження КТР, яке б забезпечило зменшення витрат на виготовлення виробу без втрати його якості. Проводиться аналіз в два етапи.

5.1. Вибір КТР, які будуть порівнюватися.

5.2. Оцінка економічних показників обраних КТР.

**Етап 6.** Прийняття рішення.

Якщо результат порівняльного аналізу задовільний – необхідне рішення знайдено, якщо ні – обирається «батьківське»  $KTP_j$  і виконується перехід до етапу 2.

Програмне забезпечення *DFA Expert* має одновіконний інтерфейс, у центральній частині якого відображається поточне КТР, а у лівій частині відображається дерево існуючих КТР. Представлені: дерево процесу складання СВ, економічні показники та ТПС (рис. 7.).

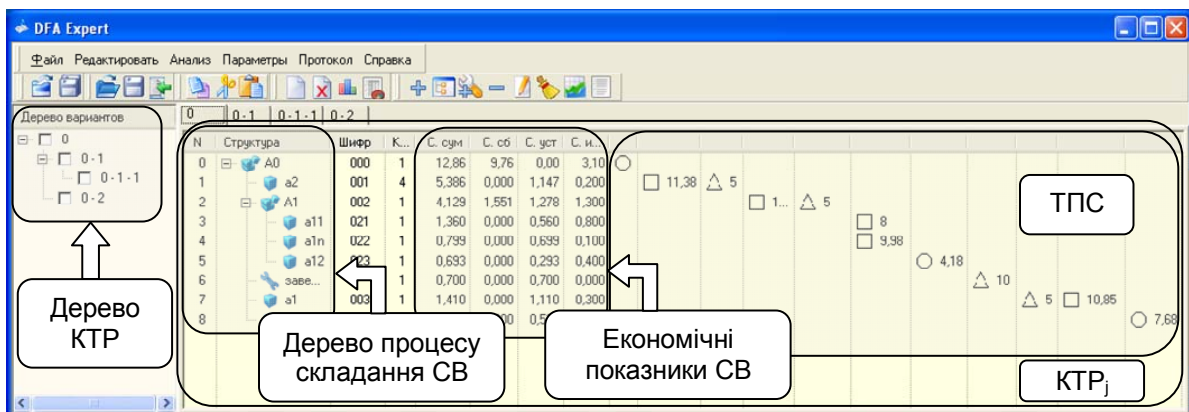


Рис. 7. Структурні елементи головного інтерфейсу DFA Expert

Для кожного елемента СВ мають бути визначені конструкторські та технологічні характеристики, які задаються та редагуються в окремому вікні (рис. 8.). Інтеграція *DFA Expert* з CAD в даній версії реалізована у вигляді імпорту з текстового файлу, що містить наступну інформацію: кількість деталей, назва, маса габаритні розміри, матеріал деталі, МПС.

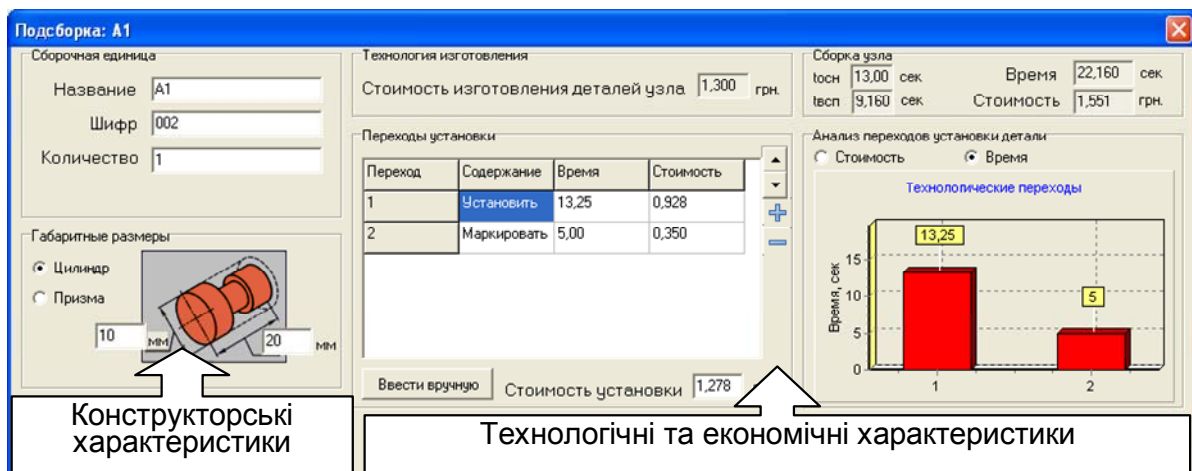


Рис. 8. Конструкторські, технологічні та економічні характеристики елементів СВ

Розрахунок часу виконання технологічних переходів базується на методиці, викладеній в [1] та являє собою експертний розрахунок сумарного впливу двох складових (рис. 9). Перша складова – основний час, що визначається з урахуванням методу реалізації з'єднання, наявності обмежень доступу, складності орієнтування та утримання елементів, енергетичних витрат. Друга складова – допоміжний час, що визначається з урахуванням орієнтування та маніпулювання, технологічних ускладнень, пов'язаних зі зчеплюваністю, гнучкістю, крихкістю елементів тощо. Вартість встановлення кожної деталі та СО у СВ розраховується на основі визначеного часу виконання операцій та розрядної сітки, яка задається в глобальних налаштуваннях проекту. Вартість виготовлення деталі вводиться вручну. За допомогою отриманих економічних показників виявляються найбільш трудомісткі з точки зору складання деталі, на які обов'язково потрібно звернути увагу.

Завершальним етапом є порівняльний аналіз трудомісткості виготовлення двох або більше варіантів КТР для одного виробу. КТР порівнюються за показниками: часу складання, вартості складання, вартості оброблення та загальної вартості виготовлення. Результатом використання програмного забезпечення *DFA Expert* є нове КТР, для якого може бути згенерований протокол ТПС.

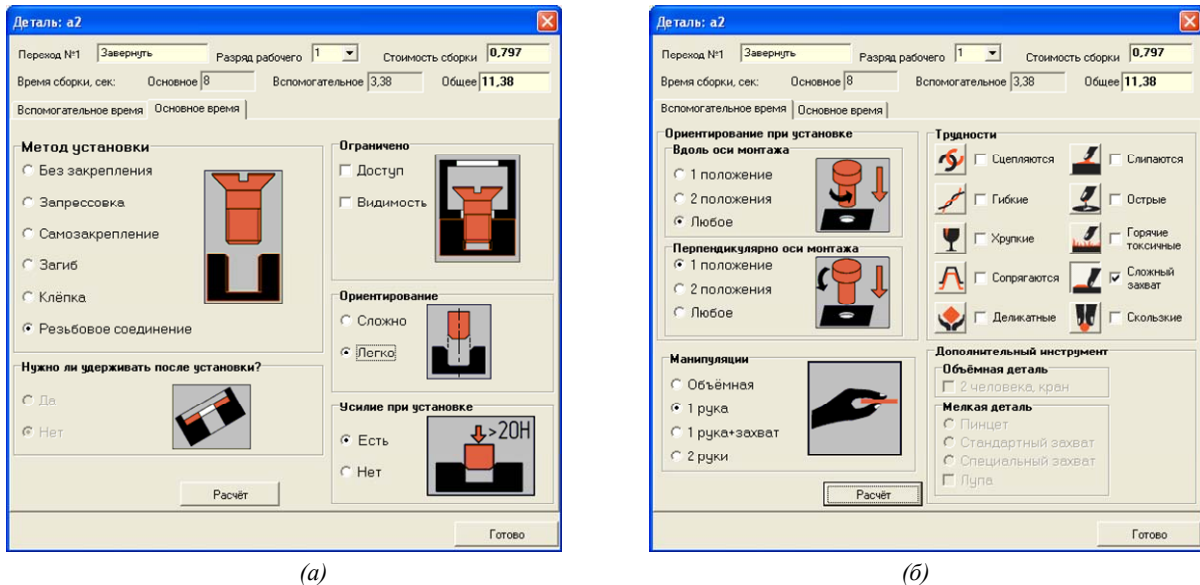


Рис. 9. Інтерфейс для розрахунку основного (а) та допоміжного (б) часу на реалізацію технологічного переходу складання

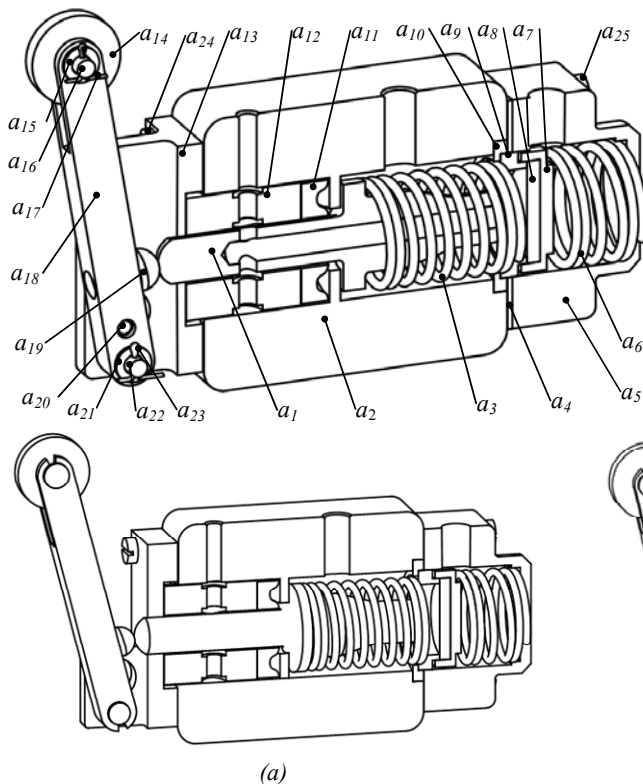


Рис. 11. Перший (а) та другий (б) варіанти переконаструювання СВ «Пневморозподільник»

Рис. 10. Пневморозподільник:  
*a*<sub>1</sub> – штовхач; *a*<sub>2</sub> – корпус;  
*a*<sub>3</sub>, *a*<sub>6</sub> – пружина; *a*<sub>4</sub> – ущільнення;  
*a*<sub>5</sub>, *a*<sub>24</sub> – кришка; *a*<sub>7</sub> – сідло;  
*a*<sub>8</sub> – клапан; *a*<sub>9</sub> – втулка;  
*a*<sub>10</sub> – шайба; *a*<sub>11</sub> – ущільнення;  
*a*<sub>12</sub> – золотник; *a*<sub>14</sub> – ролик;  
*a*<sub>15</sub>, *a*<sub>21</sub> – шайба; *a*<sub>16</sub>, *a*<sub>22</sub> – штифт; *a*<sub>17</sub>, *a*<sub>23</sub> – шплінт; *a*<sub>18</sub> – важіль;  
*a*<sub>19</sub> – опора; *a*<sub>20</sub> – штифт;  
*a*<sub>24</sub>, *a*<sub>25</sub> – гвинт

Проілюструємо використання *DFA Expert* на прикладі переконструювання та порівняльного аналізу виробу пневморозподільник, вихідний варіант конструкції представлений на рис. 10, а два варіанти переконструювання представлені на рис. 11.

Вихідна конструкція СВ «Пневморозподільник» містить 31 деталь та включає нетехнологічні різьбові та шпінтові з'єднання. Шляхом аналізу структури часових витрат на складальні операції (рис. 12.) було виявлено, що найбільш трудомісткими є процеси встановлення кришок  $a_5$ ,  $a_{24}$  та СО «Важіль».

Після виконання першої ітерації перепроєктування (рис. 11.а.), нетехнологічні шпінтові з'єднання були замінені більш технологічними з'єднаннями за допомогою пружних елементів, деталі  $a_{18}$ ,  $a_{19}$ ,  $a_{20}$  були об'єднані в одну. Перепроєктування  $KTP_0$  призвело до скорочення кількості деталей на 29%, часу складання – на 30%, витрат на виготовлення – на 23%.

Під час виконання другої ітерації перепроєктування (рис. 11.б.) корпус було об'єднано з кришками, виключені нетехнологічні різьбові з'єднання. Складання нової конструкції виконується в одному напрямку (за виключенням встановлення важелю), що виключає необхідність перебазування СВ в процесі складання. Перепроєктування  $KTP_{0-1}$  призвело до скорочення: кількості деталей – на 31,8%, часу складання – на 41%, витрат на виготовлення – на 27%.

Два етапи перепроєктування в цілому призвели до скорочення кількості деталей на 51,6%, часу складання – на 58,7%, витрат на виготовлення – на 43,7% (рис. 13.).

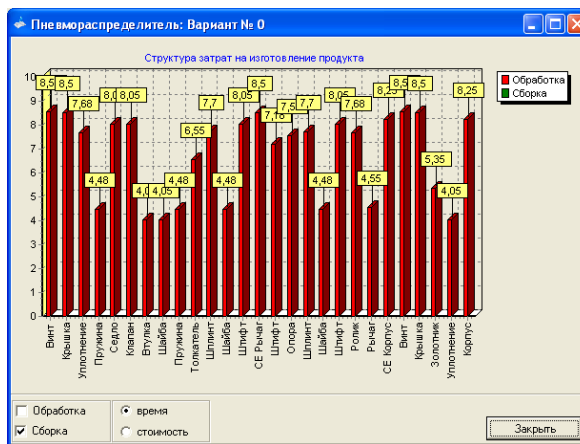
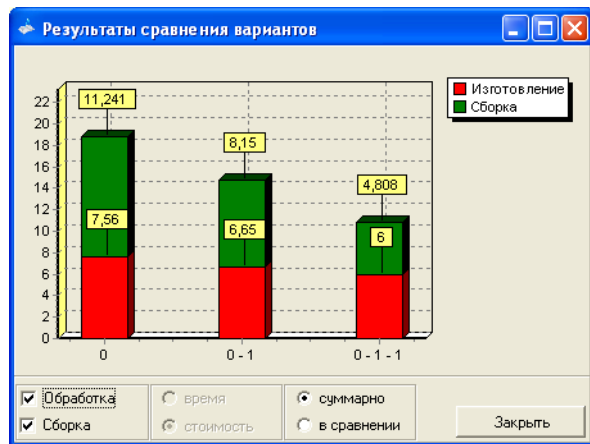
Рис. 12. Структура часовых затрат на складання  $KTP_0$ 

Рис. 13. Порівняльний аналіз варіантів переконструювання СВ

**Висновки.** Представлений метод пошуку кращого КТР та розроблене на його основі програмне забезпечення *DFA Expert* дозволяють ефективно вирішувати задачі цілеспрямованого (з метою зменшення витрат на виготовлення) перепроєктування складальних виробів. Для даного програмного забезпечення існує можливість інтеграції з іншими системами підтримки життєвого циклу виробу за рахунок використання математичної моделі СВ у вигляді БВОР та моделі процесу складання у вигляді МПС та ВА. Використання моделі СВ у вигляді БВОР дозволяє застосувати у реалізації програмного забезпечення розроблені нами раніше алгоритми автоматизованого аналізу першої групи обмежень на об'єднання деталей, і створило передумови для автоматизації процедури цілеспрямованого DFA аналізу. Застосування програмного забезпечення дозволяє підвищити ефективність обчислень за рахунок зменшення витрат, пов'язаних із складальними процесами. Перевірка ефективності цілеспрямованого пошуку кращого КТР СВ, проведена на прикладі СВ «Пневморозподільник», показала, що два етапи перепроєктування призвели до скорочення кількості деталей на 51,6%, часу складання – на 58,7%, витрат на виготовлення виробу – на 43,7%.

### Список літератури

1. Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Anthony Knight. Product design for manufacture and assembly. 2nd ed. ISBN 10: 082470584X, CRC Press Taylor & Francis Group, 2001
2. Lucas Engineering Systems Ltd., University Of Hull, Design For Assembly / Manufacture Analysis Practitioners Manual, Version 10.5, CSC Manufacturing, Solihull, UK, 1995.
3. Давыгора В. Н. Теория формализованного синтеза множества альтернатив доминирующих порядков последовательно-параллельной сборки / В. Н. Давыгора, В. А. Пасечник // Вестник НТУУ „КПИ”. – К.: 2000. – № 39 / Машиностроение. С. 55–77.
4. Пасічник В. А. Принципи формування математичної моделі складальної одиниці в виді бінарних відношень обмежень рухливості / В. А. Пасічник, В. М. Кореньков // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр XV межд. науч. техн. конф., В 4-х томах. – Донецк : ДонНТУ, 2008. Т. 3. – С. 64–70.
5. Пасічник В. А. Синтез технологічного процесу складання виробу на основі інформації про бінарні відношення обмежень рухливості / В. А. Пасічник, Ю. В. Лашина // Вісник НТУУ «КПІ» – К.: 2009. – № 57 / Машинобудування. С. 75–81
6. Кореньков В.М. Процедура целенаправленного DFA-анализа сборочных единиц / В.М. Кореньков, В.А. Пасічник, Ю.В. Лашина // Technika i technologija montazu maszyn. – 2008. – z.72. – С. 81-87.
7. Пасічник В. А. Програмне забезпечення автоматизованого формування математичної моделі складального виробу / В. А. Пасічник, Р. Р. Сімута // Вестник НТУУ „КПИ”. – К.: 2003. – № 44 / Машиностроение. С.173-175.