

В.М. Кореньков, аспір.  
Р.Р. Сімута, к.т.н.

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”

## СТРУКТУРА ПРОЦЕСУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДАННЯ ВИРОБІВ

*Розглянуті зміст та структура задач автоматизованого проектування маршрутичних технологічних процесів складання (ТПС). Наведено теоретичне обґрунтування основних положень структурного синтезу ТПС. Виявлені та представлені у вигляді математичних залежностей найбільш значимі властивості конструкцій виробів та процесу виготовлення, які впливають на порядок їх складання.*

**Постановка проблеми.** Однією з основних проблем при автоматизованому проектуванні технологічних процесів складання є встановлення взаємозв'язку між змістом процесу проектування та його математичним описанням, придатним для програмування. Зазвичай дана проблема вирішується шляхом структурування – виділення ієрархічних рівнів та стадій технологічного проектування.

**Мета роботи** – удосконалення процесу структурного синтезу технологічних процесів складання на основі аналізу властивостей складального виробу.

**Виклад основної частини.** В рамках системного підходу до проектування, виділення ієрархічних рівнів технологічного проектування виконується з метою зменшення трудомісткості та складності вихідної задачі за рахунок представлення її сукупністю взаємопов'язаних процесів рішення більш простих задач, направлених на переробку повної множини початкових даних. Як правило, формулювання задач на найвищих рівнях відображає мету процесу проектування, а з їх пониженням зміст задач конкретизується. Проектні задачі будь-якого рівня характеризуються своїм математичним формулюванням та методами рішення.

*Математичне формулювання задач* представляє собою функціональний зв'язок між результатом проектування (проектним рішенням) та початковою інформацією. У загальному випадку *функцією проектування*  $\Omega$  є кортеж, утворений функціями рішення окремих проектних задач нижчого рівня  $\Omega = \langle \Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_k \rangle$ . Зміст даних задач встановлюється із взаємозв'язку законів виготовлення (якісної зміни стану об'єкта) та економічних [1].

*Метод рішення задач* (як система прийомів чи операцій, призначених для досягнення поставленої мети) полягає у послідовному переході між проектними функціями, котрий завершується при досягненні деякого цільового стану.

При автоматизованому проектуванні (в умовах відсутності повної інформації) виникають ситуації, коли можливе прийняття недопустимих рішень і виправлення їх здійснює лише шляхом повторного виконання процесу або його частини за уточненими та доповненими даними. Тобто на кожному з рівнів проектування зі складу проектних задач чітко виділяються дві групи – задачі синтезу та аналізу проектних рішень і, відповідно, має місце ітераційна послідовність: *синтез* (може виконуватись при проектуванні декілька разів і характеризується створенням не обов'язково кінцевого варіанта проектного рішення)  $\rightarrow$  *аналіз* (оцінка та відсів варіантів, які за значеннями показників своїх властивостей не задовольняють заданим граничним або кінцевим умовам)  $\rightarrow$  *прийняття рішення* [2].

При розробці ТПС саме задачам синтезу (структурного) відводиться основне місце, оскільки від їх вирішення залежить ефективність технологічного процесу. Окрім того, дані задачі мають ряд особливостей:

- наявність формальних залежностей, застосованих до виробів довільних конструкцій;
- кінцеве число строго визначених варіантів послідовностей складання (ПС) – основи ТПС, обумовлених лише числом деталей виробу та його конструкцією;
- наявність досить великої кількості емпіричної інформації (наприклад, типових норм часу), котра апріорно дозволяє на ранніх етапах проектування оцінити ефективність розроблюваного варіанта.

Дані особливості, а також рівень розвитку сучасних 3D CAD систем (як основного джерела початкової інформації) дозволяють повністю автоматизувати синтез ПС, чим створюють усі

необхідні умови для розробки САПР технологічних процесів складання.

Проектування як процес, що розвивається в часі, поділяється на стадії виконання. У випадку автоматизованого проектування маршрутних ТПС достатнім є виділення трьох стадій:

- підпроцес* – виконання проектних процедур, які відносяться до одного ієрархічного рівня технологічного проектування і призначені для вирішення однієї задачі;
- процедура* – формалізована послідовність дій над значеннями показників властивостей процесу або об'єкта, результатом яких є проектне рішення;
- операція* – виконання елементарних дій над вихідними величинами (наприклад, логічні чи арифметичні операції).

На кожній із стадій процес проектування представляється у вигляді рішення ряду задач одного рівня, а тому його реалізація є комплексом взаємопов'язаних *математичних моделей* (систем функцій проектування), котрі допускають послідовний перехід від розгляду задач, сформульованих в рамках однієї моделі, до розгляду їх в рамках іншої. Так, наприклад, якщо через  $A = \{a_1 \dots a_n\}$  позначити множину деталей складального виробу, то підмножина декартового добутку  $R \subset A \times A = \{(a_i, a_j) / a_i \in A, a_j \in A\}$  міститиме усі можливі послідовності утворення з'єднань.

З-за наявності обмежень конструктивного та технологічного характеру лише частина  $Q \subset R$  послідовностей матиме реалізацію. А тому **процес** синтезу ТПС, з позиції теорії систем, буде представлений у вигляді функції відображення  $\Omega: R \rightarrow Q$ . Описати дану функцію через систему формул та алгоритмів – означає виявити формальні залежності між властивостями конструкції та порядком утворення виробу.

Чіткий розподіл обмежень конструктивного та технологічного характеру, що пред'являються до ТПС, дозволяє процес синтезу реалізувати у вигляді двох **підпроцесів**:

$P_1$  – визначення множини *технічно допустимих* ПС;

$P_2$  – визначення підмножини *технологічно доцільних* ПС.

Слід зауважити, що під технологічно доцільною розуміється послідовність складання виробу, котра найбільш повно відповідає умовам конкретного виробництва. А оскільки оцінка та вибір таких ПС пов'язані з розрахунками трудомісткості виконання технологічних операцій, аналізом технічних можливостей устаткування, організаційних умов виробництва та ін., то поняття «процес визначення технологічно доцільних ПС» та «розробка маршрутних ТПС» за своїм інформаційним наповненням і результатом виконання стають тотожними.

Задачі підпроцесів синтезу відповідно формулюються у вигляді функцій:

$$\left. \begin{array}{l} \Omega_1: R \rightarrow Q_{ps}; \\ \Omega_2: Q_{ps} \rightarrow Q. \end{array} \right\} \quad (1)$$

Функція  $\Omega_1$  визначення множини  $Q_{ps} \subset R$  технічно допустимих ПС ґрунтується на використанні формальних залежностей, в основу котрих покладені лише умови доступу, базування та цілісності структурних елементів виробу, що беззаперечно мають виконуватись для будь-яких конструкцій. А оскільки для математичного представлення даних залежностей достатньо використання поняття взаємного обмеження рухливості деталей, то функція  $\Omega_1$  не враховуватиме заданих у якості початкових технічних та економічних вимог до ТПС і буде інваріантною до конструкції будь-якого виробу.

Функція  $\Omega_2$  призначена для вибору підмножини  $Q \subset Q_{ps}$  технологічно доцільних ПС. Порядки складання множини  $Q_{ps}$  не рівнозначні з точки зору технічної реалізації, однак аналізу лише конструктивних особливостей виробу недостатньо для оцінки даних ПС, а тому виникає необхідність у використанні додаткових (в основному емпіричних) показників для відбору варіантів. Кількість даних показників обумовлює як ефективність прийняття рішень, так і розмірність кінцевої множини варіантів.

Межею дроблення процесу синтезу є проектні **процедури**, призначені для розкриття змісту функцій відображення та вирішення локальних задач. Нижче наведено приклади процедур, що виконуються при традиційному проектуванні.

Очевидно, що проектні процедури призначені для вирішення різних як за змістом, так і за інформаційним наповненням задач, а тому для їх формалізації стає необхідним створення підпорядкованих принципу причинності системи математичних залежностей (на основі загальних для будь-якого виробу закономірностей технології складання), що нададуть синтезу ТПС об'єктивного характеру.

*Проектні процедури підпроцесу П<sub>1</sub>:*

- визначення технологічної структури виробу (складальних одиниць з наперед заданими параметрами);
- вибору базових елементів;
- визначення ПС окремих з'єднань, структурних елементів та виробу в цілому;
- визначення множини траєкторій переміщення деталей

*Проектні процедури підпроцесу П<sub>2</sub>:*

- визначення параметрів установки елементів виробу;
- вибору технологічного обладнання;
- формування множини та розрахунку часу виконання технологічних переходів;
- визначення кількості та складу технологічних операцій маршрутних ППС

З точки зору геометрії, складальний виріб представляє собою множину просторово упорядкованих тривимірних об'єктів (деталей). Із-за неможливості існування області перетину між цими об'єктами, на траєкторії їх відносних переміщень накладається ряд обмежень, які, в свою чергу, обумовлюють строгую послідовність установки деталей. Виходячи з існування такого роду геометричних обмежень, можна стверджувати, що вироби довільних конструкцій мають однаковий набір властивостей, котрі носять об'єктивний характер. В даній статті наведено лише дві такі властивості, формальне представлення яких взяте за основу для створення математичної моделі об'єкта складання (моделі взаємодії елементів в конструкції), а також логічного виводу математичних залежностей для описання загальних закономірностей процесу складання (наприклад, моделі процесу синтезу ПС):

- 1) наявність фізичного контакту;
- 2) кінематична замкненість групи елементів.

**Основні структурні елементи виробів.** Проаналізуємо наведені вище властивості. Перша властивість (надалі позначається *C*) дозволяє ввести таке поняття, як **з'єднання** – дві деталі  $a_i$  та  $a_j$ , координати принаймні однієї з точок поверхонь котрих співпадають. Деталі утворюються без використання операції складання, а тому з'єднання можна вважати елементарною структурною одиницею виробу.

Друга властивість пов'язана лише із поняттям обмеження можливих переміщень [3–5], яке геометрично задається у вигляді траєкторій руху однієї деталі відносно іншої. Оскільки в загальному випадку множина траєкторій є нескінченною, її математичне описання виконується за допомогою поняття простору переміщень  $T_{ij}$  – об'єму простору, що містить повну множину траєкторій руху деталі  $a_i$  відносно  $a_j$  [6]. Виходячи з того, що  $T_{ij}$  на логічному рівні може приймати тільки два значення, допустиме існування відповідно двох типів з'єднань:

**Вільне з'єднання** утворюють дві деталі, між якими існує фізичний контакт і принаймні одна траєкторія взаємних переміщень:

$$\forall_A (a_i, a_j) \left\langle C(a_i, a_j) \wedge (T_{ij} \neq \emptyset) \right\rangle \quad (2)$$

**З'єднання, що забезпечує нерознімність** (ЗЗН), утворюють дві деталі, які є кінематично замкненими одна відносно одної\*:

$$\forall_A (a_i, a_j) \left\langle C(a_i, a_j) \wedge (T_{ij} \equiv \emptyset) \right\rangle \quad (3)$$

Поєднуючись у різних комбінаціях, з'єднання утворюють більш складні структурні елементи виробів. Виходячи з властивості кінематичної замкненості, такого роду елементи також можливо поділити лише на дві групи:

**Комплект** – поєднання декількох вільних з'єднань.

**Складальна одиниця (СО):** кінематично замкнена група з понад двох деталей:

$$\forall_A \forall_{A \cap a_i} (a_1, \dots, a_k) \left\langle T_{i_1, \dots, i_k} \equiv \emptyset \right\rangle \quad (4)$$

У відповідності до (4), група деталей  $A = \{a_i, a_j, \dots, a_k\}$  є кінематично замкненою (цілісною), якщо кожна деталь  $a_i$  обмежена в переміщенні по будь-якому напрямку іншою деталлю групи.

\* З технічної точки зору, ЗЗН утворюються за рахунок сили тертя (різбові, пресові з'єднання), пластичних або пружних деформацій (заклепкові, шпільтові, з'єднання за допомогою стопорних кілець та ін.), сили міжатомних зв'язків (зварні з'єднання) тощо.

У випадку, коли  $A$  містить лише одне ЗЗН, – має місце *елементарна СО*.

Вирази (2)–(4) побудовані на основі всіх можливих комбінацій значень параметрів кількості деталей та простору переміщень, а тому введених понять «з'єднання», «комплект» і «складальна одиниця» достатньо для описання виробів будь-яких конструкцій.

**Технологічна структура виробу.** Формально-логічні залежності при визначенні кількості та складу структурних елементів також отримуються, виходячи з поняття кілематичної замкненості. Проаналізуємо, наприклад, вираз (4): виконання даної умови можливо забезпечити лише при утворенні ЗЗН на останніх операціях виготовлення СО (у протилежному випадку із-за наявності вільних з'єднань група  $a_1, a_2, \dots, a_k$  втратить свою цілісність). З цього твердження слідує, що максимально можлива кількість підскладань виробу, як множини поєднань елементарних СО, обумовлюється тільки числом ЗЗН, а також всіх можливих їх комбінацій. Як наслідок, склад  $C_m$  структурних елементів визначатиметься на основі лише однієї умови доступу у вигляді об'єднання множин  $A_q^i$  деталей ЗЗН та  $B_q^i$  деталей, встановлення котрих передуватиме утворенню відповідних з'єднань (рис. 1).

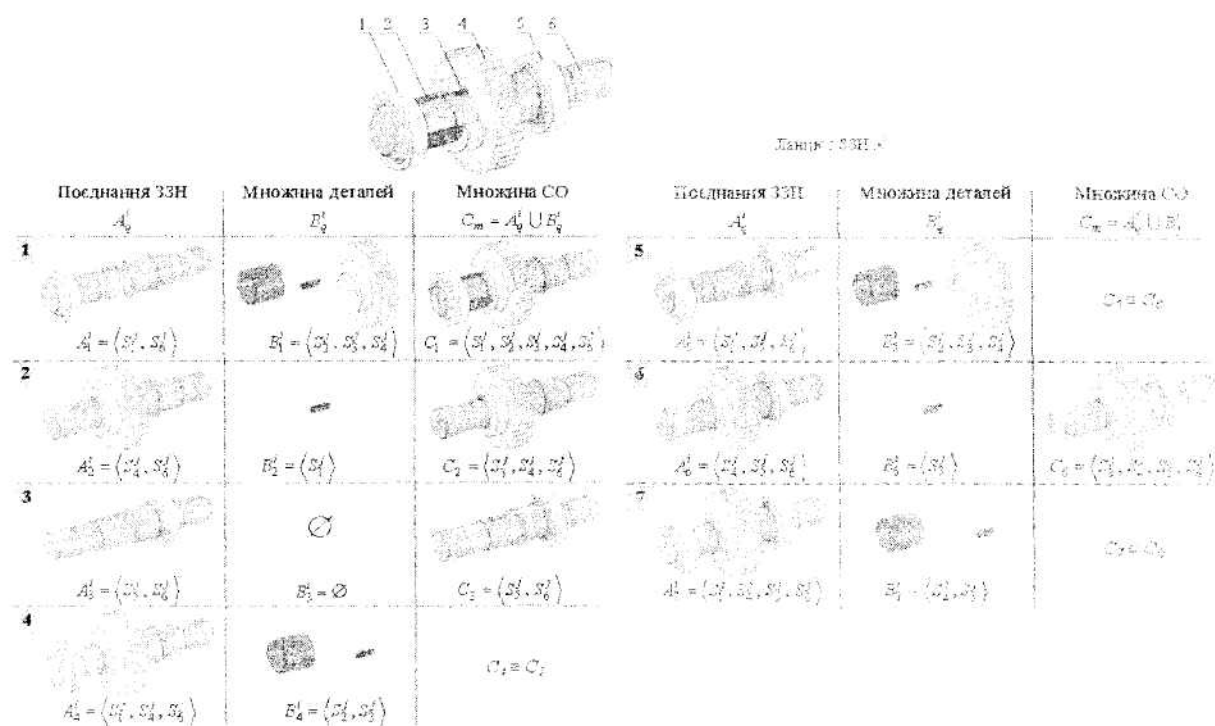


Рис. 1. Приклад визначення логічної множини СО виробу

Вище сформульована лише основна ідея розв'язання задачі визначення технологічної структури виробу. Неважко помітити, що дана задача відноситься до класу комбінаторних і в загальному випадку матиме  $\sum_{m=2}^n C_m^n = 2^n - n - 1$  рішень ( $n$  – кількість елементів ЗЗН). Зменшити її розмірність вдається на основі положень, які не суперечать логіці проектування технології складання, однак не мають чіткого математичного обґрунтування:

- Недоречно розглядати поєднання деталей ЗЗН, до яких немає доступу, оскільки заздалегідь відомо, що вони можуть бути зібраними щонайменше на попередній технологічній операції складання (тобто їх аналіз необхідно перенести на наступний рівень декомпозиції виробу).
- Реальне число поєднань має визначатись лише для ЗЗН, які мають спільні деталі. Об'єднання елементарних СО, ЗЗН котрих не мають спільних деталей, або неможливе (множини деталей СО не перетинаються), або виконується за умовою доступу, що робить зайвим генерування та аналіз їх комбінацій. Так, наприклад, на рис. 1 представлено фрагмент виробу, для 4-х деталей ЗЗН якого існує 11 теоретично можливих посліпнань, з

яких лише 7 впливатимуть на багатоваріантність рішень.

- Подальший аналіз структури СО доцільно виконувати, якщо вона не є базовим елементом, або не містить у своєму складі базової деталі (у протилежному випадку таку групу деталей неможливо буде зібрати окремо, а це означає, що вона не утворює окремий структурний елемент виробу).

Питання автоматизованого вибору базового елемента досить суперечливе і в різних авторів має різне рішення. Причиною цього є неузгодженість кількісних критеріїв оцінки з конструктивним або технологічним призначення базового елемента. Беззаперечною залишається лише така вимога, як мінімізація кількості перебазувань на всіх операціях складання. У відповідності до даної вимоги базовий елемент повинен мати:

- зовнішні поверхні, котрі не беруть участі в монтажних рухах інших елементів;
- можливість установки по прямолінійній траєкторії;
- найбільші масово-інерційні характеристики.

Виходячи з цього, рекомендується вибір базового елемента здійснювати за кількісним показником  $\xi = m_i \times f_i$ , що враховує сумарну площу вільних для доступу ділянок поверхонь  $f$  та масу  $m$  елементів.

Синтез послідовностей складання (реалізації функції проектування  $\Omega_1: R \rightarrow Q_{ps}$  (1))

Основний підхід до вирішення задач синтезу ПС слідує з формули (4). Порушивши умовно цілісність СО, отримаємо принаймні одну деталь (зі складу ЗЗП), простір переміщень котрої не замкнений. Уявне видалення даної деталі призведе до появи інших елементів, що можуть вільно переміщуватись, і т.д. Зафіксувавши черговість такого послідовно-паралельного видалення всіх елементів СО, отримаємо послідовність її розкладання.

Попереднє визначення послідовностей розкладання виробу відповідає принципу зворотного проектування [4], [5], що дозволяє:

- обмежитись при синтезі ПС перевіркою лише однієї умови – умови доступу (умова базування забезпечується автоматично);
- аналізувати вироби довільних конструкцій, оскільки кожен крок при розкладанні завжди веде до їх спрощення;
- досить просто орієнтуватись у варіантах ПС та виконувати цілеспрямований пошук найкращого з них.

Формально синтез послідовностей розкладання представляє ітераційний процес (5), при якому на першому кроці зі складу СО  $S_j^{p**}$  визначається елемент  $S_i^j$ , для якого відсутні будь-які обмеження рухливості в напрямках  $T_{i(k,m,...q)}$ ; на другому – з множини  $S_j^p \cap S_i^j$  елемент  $S_k^j$ ; на третьому – з множини  $S_j^p \cap S_i^j \cap S_k^j$  елемент  $S_m^j$  і т. д.:

$$\left. \begin{aligned} & \exists_{S_i^j} S_i^j \quad \forall_{S_j^p \cap S_i^j} (S_k^j, S_m^j, \dots, S_q^j) \left\langle (T_{i(k,m,...q)} \neq \emptyset) \rightarrow (S_j^p \cap S_i^j \prec S_i^j) \right\rangle && \text{Крок 1.} \\ & \exists_{S_k^j} S_k^j \quad \forall_{S_j^p \cap S_i^j \cap S_k^j} (S_m^j, \dots, S_q^j) \left\langle (T_{i(m,...q)} \neq \emptyset) \rightarrow (S_j^p \cap S_i^j \cap S_k^j \prec S_k^j) \right\rangle && \text{Крок 2.} \\ & \dots \\ & \exists_{S_m^j} S_m^j \left\langle S_j^p \cap S_i^j \cap S_k^j \cap \dots \cap S_m^j = \emptyset \right\rangle && \text{Крок N.} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де  $\prec$  – знак відношення слідування, а вираз  $S_j^p \cap S_i^j \prec S_i^j$  читається як „видалення елемента  $S_i^j$  передує видаленню будь-яких інших елементів із множини  $S_j^p \cap S_i^j$ ”.

Однак моделювання поетапного видалення всіх елементів дасть послідовність, максимально наближену до паралельного розкладання СО. Для того, щоб процедура (5) була придатною для синтезу будь-якої з усіх можливих ПС, необхідно її доповнити умовами відбору варіантів:

- ігнорування окремих елементів при моделюванні розкладання СО (6);

\*\* S – позначення структурного елемента виробу, нижній індекс якого є номером, а верхній індекс вказує на СО, до складу котрої входить даний елемент.

- одночасне видалення групи елементів, що мають спільні напрямки монтажу (7):

$$\forall_{S_i^p \neq S_b^j} \forall_{S_j^p \cap S_i^j} (S_k^j, S_m^j, \dots, S_q^j) \langle T_{(k,m,q)} \neq \emptyset \rangle; \quad (6)$$

$$\exists_{S_i^j \dots S_g^j} \forall_{S_i^p \cap (S_j^j, S_k^j)} (S_k^j, \dots, S_q^j) \langle T_{(i,g)(k,q)} \neq \emptyset \rangle. \quad (7)$$

У відповідності до (6), зі складу СО  $S_j^p$  можуть видалятися будь-які елементи  $S_i^j$ , окрім базових  $S_b^j$ , навіть якщо вони мають незамкнений простір переміщень. Дана умова використовується при вирішенні задачі мінімізації кількості перебазувань СО. Умова (7) використовується при визначенні груп елементів  $S_i^j \dots S_g^j$ , що мають спільні напрямки монтажу та можуть бути видаленими одночасно (технологічні групи та комплекти елементів).

Отримані у такий спосіб послідовності розкладання СО в точності є інверсними ПС, оскільки визначаються лише на основі обмежень по доступу, хоча технічна їх реалізація звичайно різна.

Результат виконання наведених вище процедур досить зручно представити у вигляді графової моделі, яка на відміну від схеми складання міститиме повну множину технічно здійснених варіантів ПС, сформованих для попередньо визначених структури та базових елементів виробу.

Синтез маршрутних ТПС (реалізація функції проектування  $\Omega: Q_{ps} \rightarrow Q$  (1)). Якщо врахувати те, що технологічний перехід при складанні – це процес установки одного елемента, то для автоматизованого вирішення даної задачі достатньо буде лише доповнити графову модель ПС інформацією (з відповідних баз даних) про час та необхідні для виконання робіт ресурси. Результатом такого інформаційного наповнення стане мережевий графік виконання технологічних переходів. Визначення структури технологічних операцій на основі даного графіка виконується шляхом об'єднання перших  $k$  переходів, які задовольняють системі обмежень технічного та організаційного характеру, з сумарним часом  $t \pm \Delta\%$  виконання технологічних операцій (заданим на основі нормативних даних).

В результаті такого аналізу отримається традиційна мережева модель, до якої можливо застосувати відомі методи оптимізації по трудомісткості або продуктивності технологічних операцій.

### Висновки.

Автоматизоване проектування ТПС розглянуто у двох аспектах:

- формалізація процесу проектування ТПС;
- формалізація основних закономірностей технології складання виробів.

Структура процесу проектування маршрутних ТПС обґрунтована з позиції системного підходу; розглянуті зміст та взаємозв'язки основних проектних задач; описані формальні процедури синтезу, аналізу та оцінки проектних рішень.

Наведені загальні властивості конструкцій виробів, на основі яких логічно обґрунтовані математичні залежності технології складання, що дозволяють:

- визначати кількість та склад структурних елементів виробу з наперед заданими параметрами;
- однозначно здійснювати вибір базових елементів СО;
- генерувати будь-які з множини технічно припустимих ПС.

На основі даних залежностей розроблені універсальні проектні процедури генерування технологічно доцільних ПС виробів, які задовольняють системі початково заданих обмежень. Результат структурного синтезу маршрутних ТПС представлено у вигляді мережевих моделей, призначених для подальшої оптимізації (за показниками трудомісткості або продуктивності) за відомими методами.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Автоматизация проектирования технологий в машиностроении / Б.Е. Челищев, И.В. Боброва, А. Гонсалес-Сабатер / Под ред. акад. Н.Г. Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. – 247 с.

2. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / В.С. Корсаков, Н.М. Капустин, К.-Х. Темпельгоф, Х. Лихтенберг / Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Машиностроение, 1985. – 304 с.
3. Давыгора В.Н., Пасечник В.А. Теория формализованного синтеза исходного множества альтернатив доминирующих порядков последовательно-параллельной сборки // Вестник НТУУ „КПИ”. – 2000. – № 39. – С. 55–77.
4. Давыгора В.М. “Зворотний” синтез технологічно доцільних порядків послідовно-паралельного складання // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 12. – С. 100–111.
5. Давыгора В.М. Методика автоматизованого синтезу раціональних порядків складання // Technologia i automatyzacja montazu. – Warszawa: OBR TEKOMA, 2001. – № 2. – С. 3–10.
6. Давыгора В.М., Кореньков В.М. Формалізація процесу проектування послідовності складання виробів // Вісник ЖІТІ. – 2002 / Спеціальний випуск / ІКТ-2002. – С. 132–138.

КОРЕНЬКОВ Володимир Миколайович – аспірант Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

– удосконалення теорії автоматизованого проектування технології складання.

E-mail: vnkorenkov@mail.ru

СІМУТА Роман Русланович – кандидат технічних наук, завідувач лабораторії віртуальних засобів навчання Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

– удосконалення систем автоматизованого проектування технологічних процесів складання та їхньої інтеграції з 3D CAD.

E-mail: simuta\_rom@ukr.net

Подано 24.01.2005