

В.М. Давигора, к.т.н., доц.

В.М. Кореньков, аспір.

Національний технічний університет України "КПІ"

### ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТІ СКЛАДАННЯ ВИРОБІВ

*Розглядаються задачі визначення кількості та складу окремих структурних одиниць виробу, формування послідовності загального та вузлового складання (в залежності від окремих виробничих факторів), а також визначення напрямків монтажу деталей та частин виробу.*

Проектування технологічного процесу складання (ТПС) виробів досить трудомісткий процес і на даний момент майже не автоматизований. В першу чергу, це пояснюється відсутністю єдиної теоретичної бази, яка дає можливість описати складний взаємозв'язок та вплив всіх виробничих факторів на процес складання. Тому, однією з основних задач сучасної технології машинобудування є формування загальних закономірностей виробництва, які виражені на даний момент в неформалізованих або слабоформалізованих знаннях та представлення їх у математичній (логічній) формі. Формалізація та узагальнення накопичених у вигляді досвіду знань є основою розвитку структурного синтезу технологічних процесів.

Представлена в даній статті математична модель є спробою формалізувати процес проектування послідовності (маршруту) складання виробів і покликана звести до мінімуму участь технолога на даній стадії проектування ТПС.

#### Загальні положення

Конструкцію будь-якого виробу можливо представити у вигляді множини з'єднань  $\bigcup_{i=1}^3 P_i$ :

$P_1 = \{p_1^1, \dots, p_k^1\}$  – з'єднання, утворення яких відбувається шляхом прямолінійного переміщення об'єктів;

$P_2 = \{p_1^2, \dots, p_n^2\}$  – з'єднання, утворення яких відбувається шляхом руху хоча б одного з об'єктів по криволінійній траєкторії;

$P_3 = \{p_1^3, \dots, p_m^3\}$  – з'єднання, що забезпечують нерозпадість (ЗЗН) групи об'єктів. ЗЗН утворюються з елементів, які мають кріпильні поверхні (різьбові, пресові) або за рахунок пластичних чи пружних деформацій (заклепкові, шпінтові з'єднання за допомогою стопорних кілець тощо).

До складу кожного з'єднання можуть входити:

- деталі – вироби, виготовлені без застосування складальних операцій з однорідного по найменуванню та марці матеріалу;
- комплекти – групи деталей, які можуть утворювати лише з'єднання типу  $P_1$  та  $P_2$  і встановлюватись під час складання тільки разом;
- складальні одиниці (СО) – групи деталей, що збираються окремо і встановлюються у виріб як одне ціле (виріб можливо розглядати як СО найвищого рівня декомпозиції). Нерозпадість СО забезпечується існуванням хоча б одного з'єднання  $P_3$ .

Однією з основних властивостей конструкції виробу, що впливає на послідовність його складання, є можливість взаємного руху частин цієї конструкції. Оскільки ця властивість характерна як для деталей, так і для комплектів та СО, – всіх їх доцільно об'єднати поняттям об'єктів або елементів виробу.

Елементом  $S_q^i = \{a_q, \dots, a_n\}^*$  виробу є деталь, при  $q = n$ , або група деталей (комплект, СО) – якщо  $q < n$ . Кожен елемент  $S_q^i = p_q^i$ ,  $p_q^i \in P_1$ , узагальнює властивості деталей, з яких він

складається (можливість відносного руху, масу, розмірні характеристики, наявність певного типу поверхонь тощо). Елементом нульового порядку  $S_0$  є виріб в цілому.

В загальному випадку до складу  $S_0$  входить певна множина СО. Оскільки між СО будь-якого рівня декомпозиції немає жодної різниці, послідовність їх складання буде формуватись по одному і тому ж алгоритму. Отже, для проектування послідовності складання виробу необхідно вирішити дві задачі: виділити зі складу  $S_0$  всі можливі СО та виконати для них процедуру синтезу послідовності складання (рис. 1).

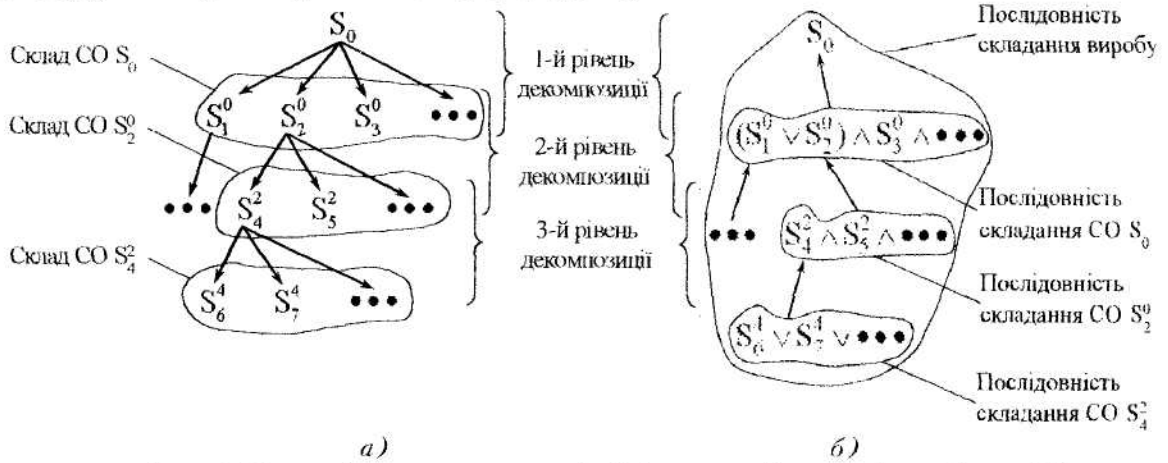


Рис. 1. Приклад структури виробу (а) та послідовності складання (б)

**Формування складу СО**

СО у математичній формі можливо представити як групу елементів, обмежених в переміщенні за всіма напрямками [1]:

$$\forall S_i^j \exists S_k^j : S_i^j \xleftarrow{T_{i,k}} S_k^j \tag{1}$$

Тобто, для кожного і-го елемента j-ї СО за будь-яким напрямком, що належить множині  $T_i$ , знайдеться елемент  $S_k^j$ , який обмежує переміщення  $S_i^j$  за даним напрямком. У (1), “ $\leftarrow$ ” – знак обмеження переміщення,  $T_{i,k}$  – в загальному випадку, об’єм простору або нескінченна множина можливих напрямків переміщень елемента  $S_i^j$  відносно  $S_k^j$  (надалі, простір переміщень).

Будь-яка траєкторія переміщення  $t$ , що належить  $T_{i,k}$ , має умовно нескінченну довжину (в усякому випадку, координати кінцевої точки траєкторії перевищують координати габаритних розмірів СО, яка розглядається). Тому будь-який елемент  $S_i^j$  СО, відповідно до (1), має замкнений простір переміщень, тобто, формулу (1) можливо записати у вигляді:

$$\forall S_i^j \forall (S_k^j, S_m^j, \dots, S_q^j) \Rightarrow T_{i(k,m,\dots,q)} \equiv \emptyset \tag{2}$$

Виконання умов (1, 2) забезпечується існуванням в СО хоча б одного з’єднання типу  $P_3$ .

Утворення ЗЗН є завершальною операцією складання СО. Очевидно, якщо визначити групи елементів, що відповідно до умови доступу встановлюються раніше, ніж елементи відповідних ЗЗН, і серед цих груп не буде спільних елементів, то кожну з них можливо буде виділити в окрему СО. Отже, для формування складу СО необхідно вирішити наступні задачі:

1. Вибрати базовий елемент (БЕ) СО, що розглядається.
2. Визначити ЗЗН, що належатимуть складальним одиницям нижчого рівня декомпозиції.
3. Сформуванати групи елементів, встановлення котрих передують утворенню відповідних ЗЗН.

4. Вилучити з розгляду групи, до складу яких входить базовий елемент СО, що розглядається (у протилежному випадку, СО нижчого рівня декомпозиції, до складу яких входить БЕ, неможливо буде зібрати окремо, що суперечить визначенню складальної одиниці).

5. Об'єднати групи елементів в складальні одиниці (очевидно, що СО можуть включати декілька або одразу всі групи елементів).

Базовим є елемент, що під час складання СО встановлюється першим:

$$\forall S_b^i : Q(S_b^i) \Rightarrow W(S_b^i) \quad (3)$$

Як базовий (властивість **W**), обирається елемент  $S_b^i$  СО, який має характерну властивість **Q**. Алгоритмічно, формула (3) виконується шляхом порівняння властивостей **Q** всіх елементів СО та вибору такого, що має максимальне, мінімальне чи інше наперед задане їх значення. **Q** може характеризувати габаритні розміри елемента, його масу, кількість ЗЗН, до складу яких входить даний елемент, кількість вільних для доступу поверхонь, технологічних баз тощо.

При розв'язанні другої задачі неможливо знати наперед, які саме ЗЗН будуть входити до тієї чи іншої СО. Тому, найпростіший шлях – проаналізувати всі можливі варіанти. Зазвичай, ЗЗН будь-якої СО утворюють множину ланцюгів  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , до складу яких входить не менше ніж два елементи:

$$\forall S_i^j \exists (S_k^j, S_f^j, \dots) : P_3(S_i^j, S_k^j, S_f^j, \dots) \quad (4)$$

У відповідності до (4), елементи  $S_i^j, S_k^j, S_f^j, \dots$  утворюють ланцюг  $A_i$ , якщо для будь-якого елемента  $S_i^j$  даного ланцюга знайдеться принаймні один елемент  $S_k^j \in A_i$ , що утворює із  $S_i^j$  ЗЗН (рис. 2).

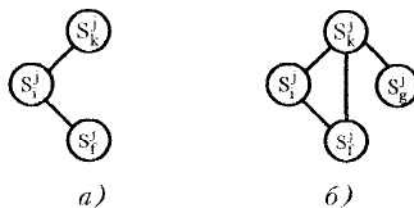


Рис. 2. Приклади ланцюгів ЗЗН (ребра між вершинами графа свідчать про наявність ЗЗН між відповідними елементами)

Наступним кроком є визначення для кожного ланцюга  $A_i$  комбінацій його елементів  $A_q^i$ .

Загальне число таких комбінацій для  $A_i$  не перевищуватиме  $\sum_{w=1}^n C_n^w = 2^n - 1$ , де  $n$  – кількість зв'язків між елементами ланцюга (кількість ЗЗН). В більшості випадків, число комбінацій значно менше вказаної величини, так як  $A_q^i$  визначаються лише для тих елементів, які утворюють ЗЗН, а також БЕ  $S_b^i \in A_q^i$ , інакше СО, до складу якої входить комбінація ЗЗН  $A_q^i$  неможливо буде зібрати поза СО. Наприклад, для ланцюга (рис.2.а) можливі три комбінації:  $A_1^i = (S_i^j, S_k^j)$ ,  $A_2^i = (S_i^j, S_f^j)$ ,  $A_3^i = (S_i^j, S_k^j, S_f^j)$  а для ланцюга (рис.2.б) – лише вісім:  $A_1^i = (S_i^j, S_k^j)$ ,  $A_2^i = (S_i^j, S_f^j)$ ,  $A_3^i = (S_k^j, S_g^j)$ ,  $A_4^i = (S_k^j, S_f^j)$ ,  $A_5^i = (S_i^j, S_k^j, S_f^j)$ ,  $A_6^i = (S_i^j, S_k^j, S_g^j)$ ,  $A_7^i = (S_g^j, S_k^j, S_f^j)$ ,  $A_8^i = (S_i^j, S_k^j, S_f^j, S_g^j)$ . Якщо ж як базовий обрати елемент  $S_k^j$  (рис. 2,б), то отримаємо тільки одну комбінацію:  $A_1^i = (S_i^j, S_f^j)$ .

Третя задача, як вказано вище, вирішується відповідно до умови доступу елементів в зону складання:

$$[\exists_{A_q^i} (S_1^j, \dots, S_m^j) \exists S_f^j] \vee [\exists_{A_q^i \cup B_q^i} (S_1^j, \dots, S_m^j) \exists S_f^j : P_3(S_i^j, S_1^j, \dots, S_m^j)] : (T_{f(i, \dots, m)} \equiv \emptyset) \Rightarrow S_f^j \in (A_q^i \cup B_q^i) \quad (5)$$

Будь-який елемент  $S_f^j$  (формула (5)) належить до групи елементів  $A_q^i \cup B_q^i$ , якщо він обмежений в переміщенні за всіма напрямками елементами  $A_q^i$  або елементами  $A_q^i \cup B_q^i$ , за

умови неутворення з ними ЗЗН.  $B_q^i$  – множина елементів, що встановлюються перед утворенням ЗЗН  $q$ -ї комбінації  $i$ -го ланцюга –  $A_q^i$ .

Розв'язання четвертої задачі полягає у виявленні груп елементів  $A_m^i \cup B_m^i$ , що не використовуватимуться для подальшого аналізу. До складу таких груп мають входити БЕ  $S_b^i$  або ЗЗН, утворення котрих спричиняє виконання попереднього положення:

$$(S_b^i \in B_m^i) \vee (\forall S_k^i \in B_m^i) \Rightarrow A_m^i \in C, \tag{6}$$

де  $C$  – множина комбінацій ЗЗН, які не можуть брати участь у формуванні складу СО.

Розв'язання п'ятої задачі, власне, і є визначенням кількості СО нижчого рівня декомпозиції та формуванням їх складу:

$$\forall S_q^j \equiv (A_q^i \cup B_q^i) \quad \forall S_p^j \equiv (A_p^i \cup B_p^i) : [(A_q^i, A_p^i) \notin C] \wedge [T_{q,p} \equiv \emptyset] \Rightarrow S_q^j \cup S_p^j. \tag{7}$$

Умова (7) аналогічна (2) і означає, що якщо простір переміщень будь-якого об'єкта  $S_q^j$  відносно  $S_p^j$  замкнений, то вони утворюють новий об'єкт – СО  $S_q^j \cup S_p^j$ .

Зауваження. Умова (7) дає можливість сформувати СО максимального складу. Очевидно, що можливо ввести певні обмеження на кількість елементів, які утворюють СО (у відповідності з вимогами, що пред'являються до ТПС). Тобто, визначатимуться лише ті СО, кількість елементів котрих не перевищує наперед заданої величини.

Звичайно, якщо формування СО не передбачене ТПС, то умови (3-7) – ігноруються.

**Синтез послідовності складання**

Основними вимогами, що визначають порядок установки деталей, є вимоги до виконання умов базування та доступу в зону складання. Виконання умови базування для деталі  $a_i$  означає визначення комплексу баз (побудови схеми базування) для даної деталі. Під комплексом баз розуміють групу деталей, яка повністю визначає положення  $a_i$  у виробі. Виконання умови доступу для  $a_i$  означає, що встановленню у виріб даної деталі не перешкоджає жодна з деталей виробу або ж елементи пристроїв чи устаткування.

Існує декілька підходів до проектування домінуючих послідовностей складання, одним з яких є метод „зворотного” синтезу [2, 3, 4]. Даний метод передбачає виділення спочатку множини порядків послідовно-паралельного розкладання виробу, чим автоматично забезпечуються умови базування та доступу, а потім трансформування їх в множину порядків послідовно-паралельного складання.

Спочатку, розглянемо процес розкладання. Невиконання хоча б для одного елемента СО умови (2) означає, що даний елемент може бути вільно видалений зі складу СО:

$$\forall S_j^p \quad \forall (S_k^j, S_m^j, \dots, S_q^j) : T_{(k,m,\dots,q)} \neq \emptyset. \tag{8}$$

Відповідно до (8) будь-який елемент  $S_j^p$ , що входить до складу СО  $S_j^p$ , можливо видалити з даної СО по довільній траєкторії  $t$ , яка має умовно нескінченну довжину:  $t \in T_{(k,m,\dots,q)}$ .

Умова (8) є, фактично, умовою доступу елементів в зону складання і означає, що при розкладанні СО  $S_j^p$ , першим видаляється елемент  $S_j^p$ , для якого відсутні будь-які обмеження рухливості в напрямках  $t$ , а під час складання – елементи  $S_k^j, S_m^j, \dots, S_q^j$ , обмежені по доступу  $S_j^p$ , встановлюються раніше ніж  $S_j^p$ . Ті з елементів  $S_k^j, S_m^j, \dots, S_q^j$ , що мають безпосередній контакт з  $S_j^p$ , утворюють комплект баз для даного елемента.

Ітераційний процес, при якому, у відповідності до (8): на першому кроці з множини  $S_j^p$  визначається елемент  $S_j^p$ ; на другому – з множини  $S_j^p \cap S_j^p$  – елемент  $S_k^j$ ; на третьому – з множини  $S_j^p \cap S_j^p \cap S_k^j$  – елемент  $S_m^j$ , і т.д. – є процесом розкладання СО. Кожен крок такого

процесу визначає послідовність видалення елементів зі складу  $S_j^p$ . Очевидно, що складання СО буде відбуватись у зворотному порядку, при чому, для кожного елемента вже забезпечена умова доступу в зону складання та визначені монтажні напрямки  $t$ .

Однак, моделювання поетапного видалення зі складу виробу всіх елементів не дасть раціональної послідовності складання, оскільки не враховані вимоги, що пред'являються до технологічного процесу (тип виробництва, організаційна форма складання, характеристики устаткування та ін.). Тому можливо сказати, що (8) є базовою процедурою, результат виконання якої повинен залежати від певних обмежень, які накладаються на розробку технологічного процесу. У якості таких обмежень можуть використовуватись наступні:

**Обмеження кількості перебазувань СО.** Відповідно до (8), виконується вимога щодо мінімальної кількості перебазувань СО під час складання. В даному випадку БЕ СО визначається як один з елементів, що мають видалятись зі складу СО на останньому кроку розкладання. Дотримання даної вимоги доцільне, наприклад, в умовах одиничного або серійного виробництва з низьким рівнем автоматизації.

Якщо БЕ СО визначити ще до виконання процедури розкладання (8), то можливо дотриматись умови неперебазування (або ж незмінності поверхонь БЕ, по яким відбувається його установка в пристрій) СО на всіх операціях складання:

$$\forall S_i^j \neq S_b^j \quad \forall (S_k^j, S_m^j, \dots, S_q^j) : T_{i(k,m,\dots,q)} \neq \emptyset. \quad (9)$$

Відповідно до (9) зі складу СО можуть видалятись будь-які елементи  $S_i^j$ , окрім базового  $S_b^j$ , навіть якщо він має незамкнений простір переміщень.

Виробнича ситуація, що відповідає (9), може виникнути у випадку, коли БЕ (наприклад, корпус двигуна чи ін.) встановлюється у пристрій-супутник і транспортується з однієї позиції складання на іншу без перебазувань аж до повного завершення складання СО.

**Порядок складання (послідовне/послідовно-паралельне).** Дане обмеження враховує можливості складального устаткування. Розробка процесу послідовно-паралельного складання можлива у випадку, якщо технологічне обладнання дозволяє встановлювати у СО декілька елементів на одній робочій позиції (наприклад, агрегатні верстати). В інших випадках, доцільно розробляти послідовний процес складання.

Формально, дані вимоги можливо записати у наступному вигляді: при послідовному складанні, у відповідності з (8) на кожному кроку розкладання повинен видалятись лише один елемент (серед можливих альтернативних варіантів, обирається елемент, що по своїм розмірним, масовим та ін., параметрам найбільше відповідає складальній операції, яка виконується на даній робочій позиції); при послідовно-паралельному складанні – видаляються всі можливі елементи, або будь-яка наперед задана їх кількість, що відповідає кількості виконавчих механізмів верстата.

Звичайно, для виконання даних обмежень, необхідно мати всі потрібні параметри наявного устаткування. Якщо ж на етапі розробки послідовності складання, устаткування не визначене – обмеження ігноруються.

Приведені вище обмеження стосуються утворення з'єднань типу  $P_1$  та  $P_2$ . З'єднання  $P_3$  дещо відрізняються від попередніх двох, а тому для них пред'являється ряд специфічних вимог.

Відповідно до (2), простір переміщень будь-якого елемента СО замкнений. Однак, процес розкладання СО (8) потребує для кожного видаляемого елемента хоча б однієї траєкторії руху. Тому, для початку процесу розкладання, необхідно забезпечити перехід від умови (2) до умови (8). Цілісність СО порушується шляхом руйнування ЗЗН, тобто видаленням з його складу одного або декількох елементів. Руйнування кожного ЗЗН можливе лише при виконанні умови (10).

$$\exists S_i^j \in P_3(S_m^j, \dots, S_k^j) \quad \forall S_q^j \notin (S_i^j, S_m^j, \dots, S_k^j) : [T_{i,q} \neq \emptyset] \wedge [G(S_i^j, S_m^j, \dots, S_k^j)]. \quad (10)$$

Формула (10) є висловом про те, що, якщо існує хоча б один елемент  $S_i^j$ , який входить до складу ЗЗН  $P_3(S_m^j, \dots, S_k^j)$  і не обмежений контактено чи віддалено в напрямках  $T_{i,q}$  іншими

елементами  $S_q^j$  СО, то таке ЗЗН можливо зруйнувати шляхом видалення з його складу  $S_i^j$ .  $G$  – властивість елементів мати зовнішні поверхні по відношенню до СО, що розглядається.

Характерною особливістю ЗЗН є те, що їх елементи спряжені з елементом  $S_i^j$ , котрий видаляється першими, по охоплюючим/охоплюєним поверхням (найчастіше, хоча б одна з поверхонь є поверхнею обертання) і руйнування ЗЗН можливе лише вздовж однієї осі  $t \equiv T_{i,q}$  – осі, паралельно якій рухаються твірні поверхонь спряження.

**Порядок руйнування ЗЗН.** Якщо є можливість паралельно зруйнувати декілька з'єднань, послідовність їх руйнування залежить, в основному від виду ЗЗН. Але, так як автоматично ідентифікувати вид ЗЗН досить складно, в подальшому будуть використовуватися наступні обмеження:

- з метою мінімізувати кількість пристроїв для утримання деталей в першу чергу руйнуванню підлягають ЗЗН, елементи яких не знаходяться в безпосередньому контакті з БЕ;
- з метою спростити процес установки кріпильних елементів, першими слід руйнувати ЗЗН, видаляемі елементи котрих мають найменший за розмірами простір переміщень.

**Послідовність видалення елементів ЗЗН.** У випадку, коли після руйнування ЗЗН з'являються декілька елементів, які мають незамкнений простір переміщень, послідовність їх видалення залежить від вимог, що пред'являються до технологічного процесу, наприклад, мінімальні габаритні розміри, вага, наявність подвійної направляючої бази (при базуванні з'єднуємих деталей по установочній та подвійній опорній базам, забезпечити компенсацію відносних поворотів деталей неможливо, як наслідок, їх складання буде супроводжуватись пружними та пластичними деформаціями ланок технологічної системи) та ін.

На послідовність складання СО можуть впливати будь-які виробничі фактори, тому перелік обмежень, що відображають закономірності процесу складання, необхідно поповнювати.

Результатом виконання наведених вище процедур – є сформовані порядки послідовно-паралельного розкладання всіх СО виробу. Послідовність складання СО отримується інвертуванням послідовності розкладання та заміною на протилежні знаків, що вказують на напрямки переміщень елементів.

### Висновки

Застосування об'єкно-орієнтованого підходу дає можливість узагальнити поняття "деталь", "комплект", "вузол", "виріб". Такий підхід дозволяє застосовувати одні й ті ж процедури до різних об'єктів, що мають подібні властивості. Приведені процедури та функції дають можливість вирішення наступних задач:

- представлення будь-якої конструкції у вигляді певних структурних одиниць – елементів;
- виділення складальних одиниць;
- однозначного визначення базового елемента кожної складальної одиниці;
- формування порядків складання всіх складальних одиниць та виробу в цілому (з забезпеченням умов базування та доступу) у відповідності з вимогами, що пред'являються до технологічного процесу складання;
- визначення напрямків монтажу деталей виробу.

Даний алгоритм дає можливість одразу визначити множину домінуючих (технологічно доцільних) порядків послідовно-паралельного складання, що значно спрощує процес проектування, оскільки виключається необхідність аналізу та генерування заздалегідь недоцільних порядків складання.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Челищев Б.Е., Боброва И.В., Гонсалес-Сабатер А. Автоматизация проектирования техно-логгии в машиностроении / Под ред. акад. Н.Г. Бруевича. – М.: Машиностроение, 1987. – 247 с.: ил.
2. Давигора В.М. Методика автоматизованого синтезу раціональних порядків складання // Technologia i automatyzacja montazu. – Warszawa: OBR TEKOMA, 2001. – № 2. – С. 3–10.

3. Давыгора В.М. “Зворотний” синтез технологічно доцільних порядків послідовно-паралельного складання // Вісник ЖІТІ. – 2000. – № 12 / Технічні науки. – С. 100–111.
4. Давыгора В.Н., Пасечник В.А. Теория формализованного синтеза исходного множества альтернатив доминирующих порядков последовательно-параллельной сборки // Вестник НТУУ “Киевский политехнический институт”. – Машиностроение. – 2000. – № 39. – С. 55–77.

ДАВИГОРА Вадим Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування Механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України “КПІ”.

Наукові інтереси:

– удосконалення теорії автоматизованого проектування технології складання.

Тел.: (044) 263-37-22.

E-mail: mosk@health.kiev.ua

КОРЕНЬКОВ Володимир Миколайович – аспірант кафедри технології машинобудування Механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

– удосконалення теорії автоматизованого проектування технології складання.

Тел.: (04494) 4-15-54.

E-mail: vnkorenkov@mail.ru

Подано 18.09.2002