

14. Пат. на корисну модель 10347 України, МПК В01F5/00. Устаткування для обробки води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.В. Третько, І.І. Сорока (Україна); Хмельницький нац. ун-т. – u 200503620; заяв. 18.04.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11. – 3 с.

15. Пат. на корисну модель 25775 України, МПК В01F 5/00. Квітаційний пристрій для обробки води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, В.В. Третько, Є.А. Урбанюк (Україна); Хмельницький нац. ун-т. – u200702555; заяв. 12.03.2006; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13. – 3 с.

16. Пат. на корисну модель 25811 України, МПК В01F 5/00. Вібраційний квітатор для зміни властивостей води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, О.А. Гордєєв, В.В. Третько, Є.А. Урбанюк (Україна); Хмельницький нац. ун-т. – u200703370; заяв. 28.03.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13. – 3 с.

Надійшла 7.12.2009 р.

УДК 621.757; 681.52

В.Н. КОРЕНЬКОВ, В.А. ПАСЕЧНИК, А.А. СУБИН

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СИНТЕЗ МНОЖЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СБОРКИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

*Рассматриваются задачи определения структуры изделия (состава и количества сборочных единиц), формирования множества технически реализуемых и технологически обоснованных последовательностей общей и узловой сборки, а также определения направлений монтажа деталей и отдельных частей изделия.*

*Tasks of determination of structure of products (composition and quantity of assembly units), forming of multitude of the technically realized and technologically grounded assembly sequences, and determinations of directions of editing of parts and assembly units are considered.*

Ключевые слова: изделия машиностроения.

В современных условиях спрос на рынке товаров быстро изменяется, что в свою очередь, вынуждает производителя быстро переналаживать производство на выпуск новой высококачественной продукции. При таких обстоятельствах традиционные методы проектирования технологических процессов сборки (ТПС), которым свойственны сильно выраженные эвристичность и частный характер, становятся непригодными. Необходимость оперирования разнообразной по форме нечисловой информацией декларативного, нормативного и эмпирического происхождения, а также многовариантность и широкий диапазон возможных решений не дают возможности анализа полного множества альтернатив. В такой ситуации при проектировании нет гарантии, что полученный результат лучше или, по крайней мере, не хуже другого возможного результата. Как следствие – неоправданные затраты времени и материальных средств при технологической подготовке производства. Выходом из сложившегося положения является автоматизированное решение ряда технологических задач, не требующих от человека творческого подхода. При проектировании ТПС к таким задачам следует отнести, в первую очередь, синтез и анализ последовательностей сборки (ПС) изделий.

**Основные положения.** Автоматизация проектирования ТПС предполагает наличие соответствующих математических моделей, разработка которых требует определения свойств конструкций изделий, влияющих на последовательность их сборки. Так как ПС является последовательностью образования соединений, то в качестве основных свойств, присущих любой конструкции, возможно принять наличие физического контакта и кинематическую замкнутость групп элементов.

Любое сборочное изделие (СИ) является множеством соединенных между собой деталей. Поскольку минимальное количество элементов такого множества равно двум, то исходя из упомянутых выше свойств, допустимо существование только двух типов соединений (рис. 1).

Элементарное соединение образуют две детали, между которыми существует физический контакт (свойство С) и, по крайней мере, одна траектория взаимных перемещений  $t \in T_{ij}$ . А соединение обеспечивающее нераспадаемость (СОН) – две детали, кинематическая замкнутость которых обеспечивается лишь за счет сил трения (резьбовые, прессы, пластические или упругих деформаций (заклепочные, шпильковые, соединения посредством стопорных колец...), сил межатомных связей (сварные) и др.

Сочетаясь в различных комбинациях, минимальные структурные единицы изделия образуют более сложные структурные элементы. Исходя из свойства кинематической замкнутости, такого рода элементы также возможно разделить только на две группы – кинематически незамкнутые (комплекты) и кинематически замкнутые – элементарные сборочные единицы (СЕ). Под элементарной СЕ понимается группа не менее трех деталей, содержащая только одно СОН, целостность которой не нарушается во время манипулирования либо выполнения технологических операций.

Исходной информацией для формализованного выявления структурных элементов, а также синтеза последовательностей их сборки является характеристика относительного расположения деталей в СИ, в

качестве которой могут выступать бинарные отношения ограничений подвижности [1]. Данная информация представляется в виде графов или матриц, отображающих возможность относительного перемещения деталей в отдельных наперед заданных направлениях. Однако в общем случае множество таких направлений является бесконечным, поэтому возникает необходимость в определении понятия *пространства перемещений* – 3D объекта, содержащего координаты всех траекторий движения одной детали относительно другой. Математически, данного рода информация может быть представлена в виде векторов (рис. 2), являющихся образующими телесного угла (в случае анализа только прямолинейных поступательных перемещений).

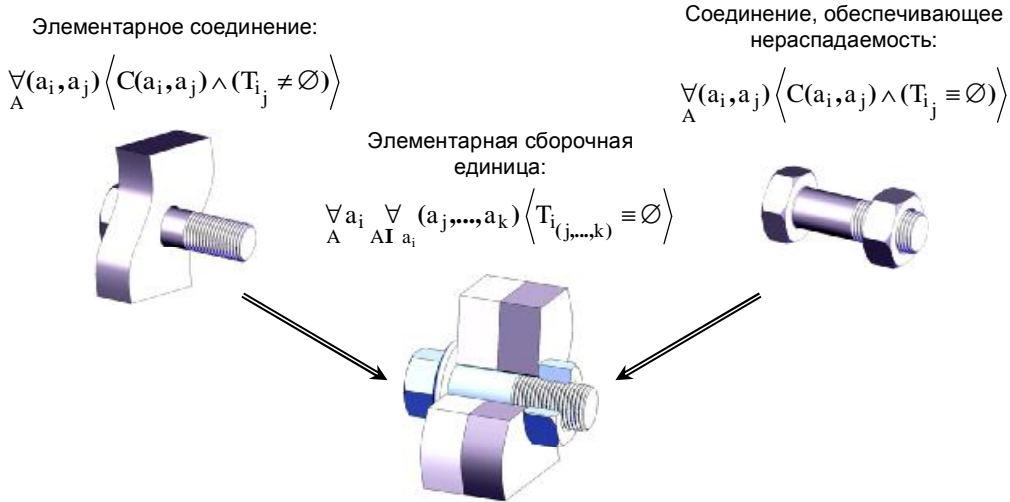


Рис. 1. Примеры элементарных структурных единиц СИ

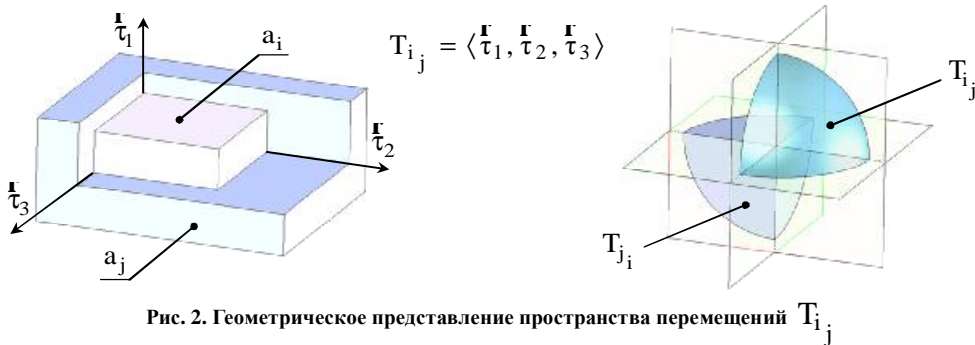


Рис. 2. Геометрическое представление пространства перемещений  $T_{ij}$

Процедура определения пространства перемещений выполняется на основе анализа поверхностей контакта 3D моделей сборочного чертежа с последующей проверкой наличия *удаленных ограничений подвижности* (имеют место при отсутствии физического контакта между деталями [2]).

**Структурный анализ изделия.** Синтез последовательности сборки требует четко определенной *технологической структуры СИ* – множества иерархически подчиненных СЕ, удовлетворяющих определенному уровню дифференциации технологических операций. Основная идея при определении данного множества заключается в следующем. Так как любые СИ составляют элементарные СЕ, то исходя из определения, их кинематическое замыкание возможно только при образовании СОН на последней операции сборки. Следовательно, СОН изделия и их сочетания определяют *количество*, а множество деталей, установка которых предшествует образованию соответствующих СОН (по условию доступа), определяют *состав* всех возможных структурных единиц изделия. В качестве примера практического применения данного подхода рассмотрим синтез последовательности сборки СИ „Насос с перемещающимся камнем” (рис. 3,а).

На рис. 3,б приведена исходная матрица пространства перемещений, в которой с целью упрощения изложения дальнейшего материала предварительно занесены удаленные ограничения подвижности деталей СИ (обозначены темным цветом). Данная матрица является аналогом представления условий базирования и доступа, а каждая её непустая клетка содержит информацию о множестве направлений перемещения *i*-го элемента СИ относительно *j*-го.

**Первым шагом** при формировании технологической структуры изделия является определение множества сочетаний СОН. Данная задача является комбинаторной, однако ее размерность возможно существенно понизить, если учесть то, что объединение элементарных СЕ в более сложные выполняется двумя путями:

- последовательным вхождением ( $CE_i$  ограничивает перемещение по любому направлению как минимум одной детали  $CE_j$ );
- параллельным присоединением (только СОН элементарных  $CE_i$  и  $CE_j$  имеют общие детали).

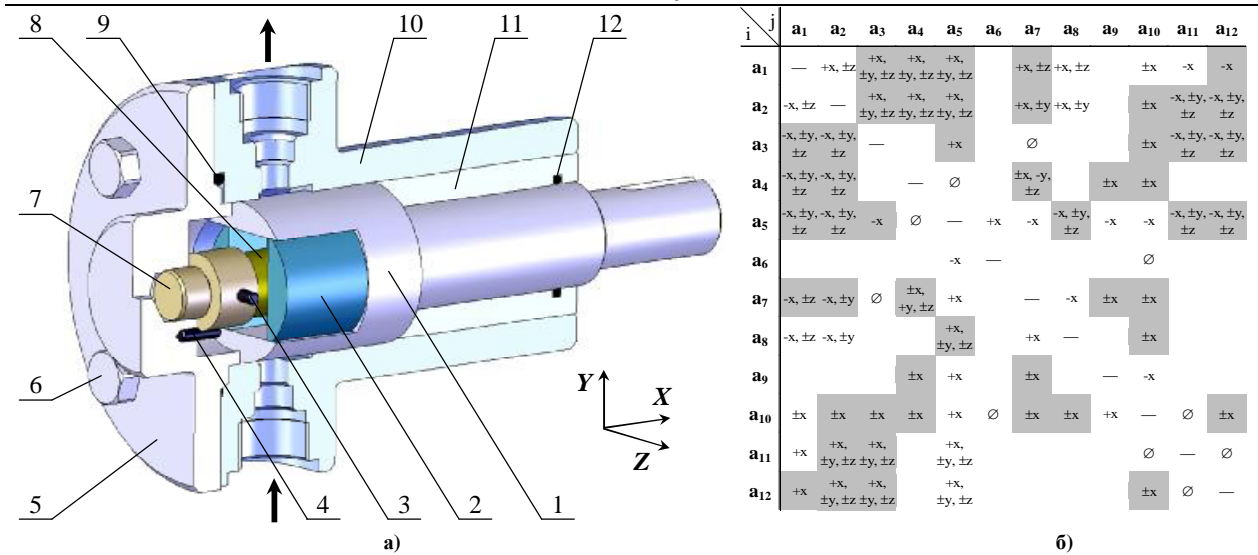


Рис. 3. Насос с перемещающимся камнем (а); исходная матрица пространства перемещений деталей СИ (б)

Поскольку в первом случае имеет место ограничение по доступу, то сборка СИ возможна лишь последовательно. Во втором случае множества деталей, установка которых предшествует образованию соответствующих СОН, не пересекаются, а, следовательно,  $CE_i$  и  $CE_j$  могут образовываться независимо (параллельно).

Именно параллельное соединение элементарных СЕ влияет на многовариантность структурных решений. Существенной его особенностью является наличие свободных для доступа поверхностей деталей СОН (т.к. эти детали устанавливаются в СИ последними). На основании данного свойства можно сделать вывод, что цепочки СОН, ко всем деталям которых нет доступа, определяют СЕ, сборка которых обязательна и должна выполняться, по крайней мере, на следующем уровне декомпозиции СИ. А СОН или их сочетания, к поверхностям деталей которых есть доступ, определяют СЕ, необходимость образования которых обуславливается заданным уровнем дифференциации операций.

В данном случае  $CE_0$  первого уровня декомпозиции (СИ в целом) содержит СОН:  $\langle a_6 - a_{10} \rangle$  – резьбовое,  $\langle a_3 - a_7 \rangle$ ,  $\langle a_4 - a_5 \rangle$ ,  $\langle a_{10} - a_{11} \rangle$  – прессовое и  $\langle a_{11} - a_{12} \rangle$  – упруго-деформируемое. Некоторые из этих соединений имеют общие детали, поэтому графически их возможно представить в виде цепочек (рис. 4,а). Среди пяти СОН имеется только одно  $\langle a_6 - a_{10} \rangle$ , к поверхностям деталей которого есть доступ, все же остальные СОН или цепочки будут определять совокупность СЕ второго уровня декомпозиции СИ.



Рис. 4. Цепочки СОН СИ (а); пример формирования множества возможных СЕ первого уровня декомпозиции СИ (б)

**Вторым шагом** структурного анализа СИ является проверка условия доступа. Деталь  $a_f$  входит в состав  $CE_m = A_q^i \cup B_q^i$ , если она ограничена в перемещении (поступательном) по всем направлениям множеством уже определенных элементов  $(a_j, \dots, a_k) \in (A_q^i \cup B_q^i)$ :

$$\forall a_f \notin (A_q^i \cup B_q^i) \quad \forall_{A_q^i \cup B_q^i} (a_j, \dots, a_k) \left( \langle T_{f(j, \dots, k)} \rangle \equiv \emptyset \rightarrow a_f \in (A_q^i \cup B_q^i) \right),$$

где  $B_q^i$  – множество деталей, установка которых предшествует образованию СОН  $A_q^i$ .

В результате выполнения данной процедуры будет получено 4 варианта СЕ (рис. 4,б) из которых возможно собрать изделие на первом уровне декомпозиции (общая сборка) и которые необходимо в дальнейшем оценить.

Особенностью любой СЕ является то, что она должна собираться отдельно – вне изделия. Следовательно, предварительно необходимо выбрать объект, относительно которого будет определяться возможность такой сборки. Подобным объектом, как правило, выступает базовый элемент – деталь или СЕ, с

установки которого начинается процесс сборки. Однако теоретически, сборку изделия возможно начинать с любой детали, поэтому базовый элемент, в соответствии со своим конструктивным или технологическим назначением, должен иметь некоторую характерную особенность.

В данной работе в качестве базового принимается элемент, обеспечивающий на всех операциях сборки СЕ неизменность схемы базирования (постоянство поверхностей, по которым происходит его установка в приспособлении). Для достижения этой цели базовый элемент должен иметь:

- внешние поверхности, которые не принимают участия в монтажных движениях других элементов;
- возможность установки по прямолинейной траектории;
- значительно большие массово-инерционные характеристики, чем любая другая присоединяемая деталь или СЕ.

Исходя из возможности автоматического ввода исходной информации, в качестве основных факторов выбора базового элемента рекомендуется принять максимальные массовую характеристику  $m_i$  и площадь  $f_i$  свободных для доступа участков поверхностей. Путем сравнения данных характеристик деталей  $a_1...a_{12}$  и  $CE_1...CE_4$  по показателю  $z = (m_i \cdot f_i) / (m_j \cdot f_j)$ , в качестве базовой для  $CE_0$  была принята

$$CE_4 = \langle a_{10}, a_{11}, a_{12} \rangle.$$

Таким образом, определение структуры первого уровня декомпозиции СИ свелось к нахождению СЕ, не содержащих детали  $a_{10}, a_{11}, a_{12}$  базового элемента. Из приведенного на рис. 4,б множества, только  $CE_1$  и  $CE_2$  могут быть собраны вне изделия, а  $CE_3$  исключается из дальнейшего анализа еще и потому, что по составу тождественна  $CE_0$  (нарушается принцип иерархичности).

Процесс определения технологической структуры СИ является итерационным. Приведенные выше процедуры повторяются на каждом уровне декомпозиции для всех СЕ, выявленных в ходе анализа, а результат их выполнения представлен на рис. 5,а.

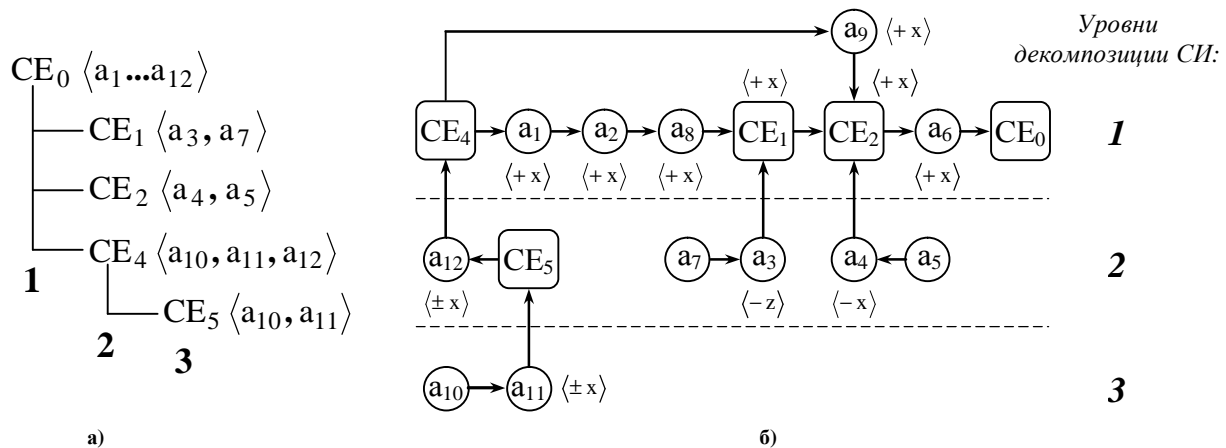


Рис. 5. Структура СИ (а); граф ПС (б)

**Синтез ПС.** Процедура формирования ПС выполняется в соответствии с основными положениями методики «обратного» синтеза [3, 4]. Данная методика предусматривает изначально моделирование процесса разборки изделия, чем автоматически обеспечивается выполнение условий доступа и базирования, а ПС получаются путем инвертирования последовательностей разборки.

Анализ матрицы пространства перемещений выполняется по строкам, поэтому определение множества последовательностей разборки начинается с разрушения СОН (рис. 6,а) и далее сводится к поиску элементов, имеющих общие направления удаления (рис. 6,б). Итерационный процесс поиска такого рода элементов, фиксации последовательности их удаления и поэтапного сужения матриц, соответствует процессу последовательно-параллельной разборки, который выполняется для всех СЕ, а также изделия в целом.

Результат выполнения процедуры синтеза достаточно удобно представить в виде графа (рис. 5,б) – аналога схемы сборки. Каждая дуга данного графа отображает возможность только последовательной установки элементов (деталей или СЕ), а направление стрелки указывает на номер элемента, который последним в схеме доступа замыкает пространство перемещений предшествующего элемента. В случае параллельной сборки рассматриваются одновременно несколько ветвей графа, при соблюдении условий доступа в пределах каждой из них.

С точки зрения конструктивных особенностей изделия, все приведенные на рис. 5,б ПС технически осуществимы и абсолютно равноценны. Следовательно, возникает необходимость в выборе только тех последовательностей, которые наиболее полно отвечают условиям конкретного производства, т.е. являются технологически целесообразными. Иначе говоря, дальнейшая оценка ПС возможна лишь на основе разработанного маршрутного ТПС.

Как известно, маршрутный ТПС изначально представлен упорядоченным множеством переходов:

$ТПС_k = \langle p_1, p_2, \dots, p_m \rangle$ . В дальнейшем, переходы объединяются по ряду признаков, в результате чего формируется последовательность операций, которая является наилучшей, для каждого конкретного случая:  $ТПС_k = \langle Q_1(p_1..p_3), Q_2(p_4), \dots, Q_n(p_j..p_m) \rangle$ . Если учесть то, что технологический переход  $p_i$  – это процесс установки одного элемента, то для автоматизированного формирования маршрутного ТПС достаточно лишь дополнить граф ПС информацией о времени и необходимых для выполнения работ ресурсах. Результатом такого информационного наполнения будет сетевой график выполнения технологических переходов, методы анализа которого достаточно широко известны. На основании исходных данных возможен также не только анализ сетевого графика, но и улучшение базового варианта ТПС путем перегруппирования схемы сборки [5].

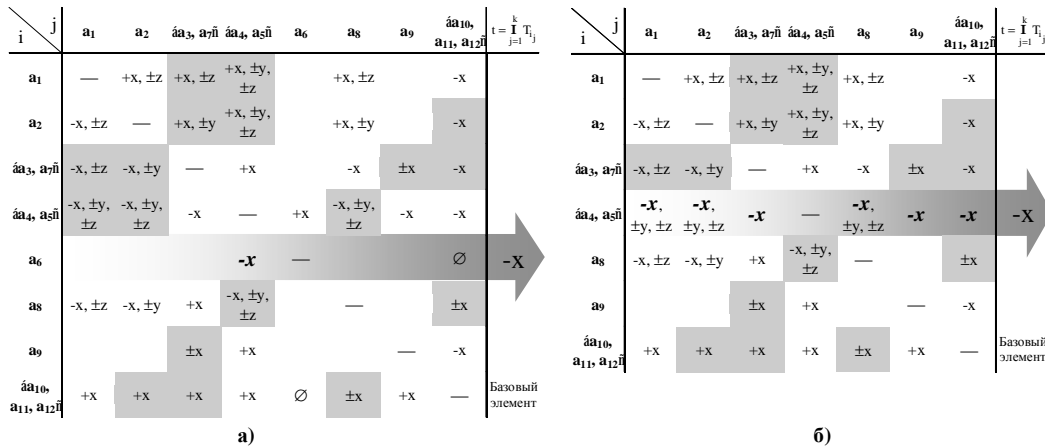


Рис. 6. Первый шаг разборки  $CE_0$  – разрушение СОН (а); матрица пространства перемещений элементов  $CE_0$ , суженная после удаления детали  $a_6$  (б)

**Выводы.** Приведены основные положения методики автоматизированного синтеза порядков последовательно-параллельной сборки изделий. В основу методики положен принцип «обратного» проектирования, при котором синтезу ПС предшествует формирование допустимых конструкцией СИ последовательностей разборки. Процесс синтеза представлен двумя подпроцессами:

- 1) определения иерархической структуры изделий, количество и состав СЕ которых соответствует заранее заданному уровню дифференциации технологических операций;
- 2) формирования для каждой СЕ технически реализуемых ПС, с учетом направлений монтажа сборочных элементов.

К характерным особенностям методики относятся:

- возможность определения ПС изделий с произвольным количеством деталей, что обусловлено полиномиальной зависимостью процесса формирования и анализа матриц пространства перемещений от числа деталей;
- анализ всех допустимых конструкцией СИ вариантов ПС, удовлетворяющих заранее заданным ограничениям, путем исключения заведомо нецелесообразных вариантов на начальных этапах синтеза;
- полная автоматизация ввода характеристик пространственного положения деталей, при условии выполнения конструкторской документации в одной из современных 3D CAD систем;
- представление результата выполнения процедур синтеза в виде сетевых графиков, содержащих исходную информацию для дальнейшего проектирования ТПС.

### Литература

1. Давыгора В.Н. Теория формализованного синтеза исходного множества альтернатив доминирующих порядков последовательно-параллельной сборки / В.Н. Давыгора, В.А. Пасечник // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – 2000. – № 39. – С. 55– 77.
2. Сімута Р.Р. Забезпечення якості і прискорення технологічної підготовки механоскладального виробництва: Дис: .. канд. техн. наук: 05.02.08. – К., 2003. – 174 с.
3. Давыгора В.М. Методика автоматизованого синтезу раціональних порядків складання / В.М. Давыгора // Technologia i automatyzacja montazu. – Warszawa: OBR ТЕКОМА. – 2001. – № 2. – С. 3– 10.
4. Давыгора В.М. Формалізація процесу проектування послідовності складання виробів / В.М. Давыгора, В.М. Кореньков // Вісник ЖІТІ – 2002. Спеціальний випуск. ІКТ. – 2002. – С. 132– 138
5. Кореньков В.М. Модель автоматизованого синтезу маршрутного технологічного процесу складання виробів / В.М. Кореньков // Вісник технологічного університету Поділля. Технічні науки. – 2003. – № 4. Ч.2. – С. 228– 235.

Надійшла 4.12.2009 р.