

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СБОРКИ В АВТОМАТИЧЕСКОМ СБОРОЧНОМ РОТОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ**Кульбида О. О.**

Проведен анализ кинематических схем сборки, который говорит о возможности сборки разных по типу модулей соединения на одном оборудовании при использовании выделенных в процессе анализа идентичных схем. Это дает возможность объединять разные изделия в группы, переходить к большей серийности выпуска с использованием автоматического оборудования. Получены аналитические выражения, описывающие сложные движения в БТВ и в роторе, что дает возможность определять аналитически положения БТВ и деталей в системе координат ротора в любой момент времени, создать системы контроля над процессом сборки и снизить количество отказов в системы.

Проведено аналіз кінематичних схем складання, який говорить про можливість складання різних за типом модулів з'єднання на одному обладнанні при використанні виділених у процесі аналізу ідентичних схем. Це дає можливість об'єднувати різні вироби в групи, переходити до більшої серійності випуску з використанням автоматичного обладнання. Отримано аналітичні вирази, що описують складні рухи в БТВ і в роторі, що дає можливість визначати аналітично положення БТВ і деталей в системі координат ротора в будь-який момент часу, створити системи контролю над процесом складання і знизити кількість відмов у системі.

The analysis of kinematic schemes of the assembly, which suggests the possibility of assembling of different types of connection modules on the same hardware when using the isolated identical schemes in the analysis. This makes it possible to combine different products in the group, move on to a greater mass production using the automated equipment. The analytical expressions, describing the complex movements in of BTV and the rotor, which makes it possible to determine analytically the location and the parts of BTV in the coordinate system of the rotor at any time, and create a system of control over the assembly process and reduce the number of failures in the system are obtained.

Кульбида О. О.

ассистент ДонНТУ
olga_kulbida@mail.ru

УДК 621. 923

Кульбида О. О.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СБОРКИ В АВТОМАТИЧЕСКОМ СБОРОЧНОМ РОТОРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АФФИННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Работа технологической системы, состоящей из нескольких технологических модулей – роторов, основана на технологических и транспортных движениях. Кинематика технологической системы изучает состав и геометрические свойства механического движения элементов технологической системы в процессе выполнения технологического процесса (например, сборки). Создание конкретных вариантов технологических систем и их технологических модулей невозможно без разработки принципиальных кинематических схем и учета геометрических параметров собираемых элементов. Это связано с тем, что в модели построения технологической системы [1] необходимо задание пространственных отношений. Пространственные отношения характеризуют взаимное положение элементов технологической системы и положение их составных частей в пространстве и друг относительно друга. Эти отношения задаются математическими функциями, которые определяют детерминированные связи между элементарными движениями принципиальных кинематических схем технологических систем.

Для моделирования процесса сборки необходимо провести кинематический анализ собираемых соединений. Описав при помощи аффинных преобразований пространства полученные кинематические схемы, можно аналитически определять положение каждой детали в системе координат БТВ, а пользуясь приведенными выше зависимостями осуществлять переход в систему координат ротора

Представляет интерес сопоставить кинематику типовых соединений, рассматриваемых в теории взаимозаменяемости и технических измерений. Используем модульный принцип, предложенный проф. Базровым Б. М. [2]. Согласно ему совмещение модулей поверхностей детали создает соединение, которое называется модулем соединения. Плоские, шпоночные и шлицевые соединения соответствуют модулю соединения МС1, резьбовые цилиндрические и конические соединения соответствуют модулям МС2 и МС3, цилиндрические гладкие соединения соответствуют модулю МС4, конические – МС6, а сферические – МС7. Модуль МС5 не охвачен типовыми соединениями.

Целью работы является моделирование процесса сборки в автоматическом сборочном комплексе с использованием сопоставления кинематики типовых модулей соединений.

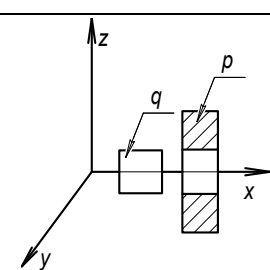
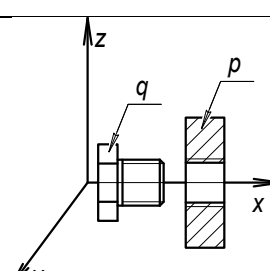
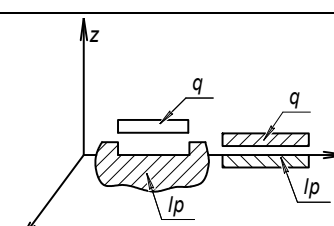
Рассмотрим кинематику следующих модулей соединений: соединение по плоским поверхностям (МС1), резьбовые цилиндрические соединения (МС2) и цилиндрические соединения (МС4).

Для проведения кинематического анализа каждое из соединений рассмотрим в системе координат БТВ, в которой базовая деталь q (деталь к которой присоединяют) и присоединяемая деталь p имеют возможность совершать трансляцию вдоль соответствующих осей – α и ротацию – β . Для удобства представления информации результаты анализа сведем в табл. 1.

После анализа схем сборки модулей можно отметить, что модули соединений МС4, МС2, МС3, МС6 могут собираться на одинаковом оборудовании при реализации кинематических схем сборки соединения МС2 при условии идентичности условий собираемости. Модули соединений МС4 и МС1 могут собираться на одинаковом оборудовании при реализации ряда кинематических схем сборки соединения МС5.

Таблица 1

Варианты кинематических схем сборки

1. Цилиндрические соединения (MC4):							
1.1	$[q_{\beta y}; P_{\alpha x}]$	1.8	$[q_{\alpha x}; P_{\alpha x \beta y}]$	 <p>Модуль соединения MC4</p>			
1.2	$[q_{\alpha x}; P_{\beta y}]$	1.9	$[q_{\alpha x \beta y}; P_{\alpha x \beta y}]$				
1.3	$[q_{\alpha x \beta y}; P]$	1.10	$[q_{\alpha x \beta x}; P_{\alpha x}]$				
1.4	$[q; P_{\alpha x \beta y}]$	1.11	$[q_{\alpha x}; P_{\alpha x \beta x}]$				
1.5	$[q; P_{\alpha x \beta x}]$	1.12	$[q_{\alpha x \beta x}; P_{\alpha x \beta x}]$			1.15	$[q_{\alpha x}; P_{\alpha x}]$
1.6	$[q_{\alpha x \beta x}; P]$	1.13	$[q; P_{\alpha x}]$			1.16	$[q_{\alpha x}; P_{\beta x}]$
1.7	$[q_{\alpha x \beta y}; P_{\alpha x}]$	1.14	$[q_{\alpha x}; P]$			1.17	$[q_{\beta x}; P_{\alpha x}]$
2. Соединение с цилиндрической резьбой (MC2):							
2.1	$[q; P_{\alpha x \beta x}]$	2.5	$[q_{\alpha x}; P_{\alpha x \beta x}]$	 <p>Модуль соединения MC2</p>			
2.2	$[q_{\alpha x \beta x}; P]$	2.6	$[q_{\alpha x \beta x}; P_{\alpha x}]$				
2.3	$[q_{\alpha x}; P_{\beta x}]$	2.7	$[q_{\alpha x \beta x}; P_{\alpha x \beta x}]$				
2.4	$[q_{\beta x}; P_{\alpha x}]$						
3. Соединение по плоским поверхностям (MC1)							
3.1	$[q; P_{\alpha z}]$	3.13	$[q; P_{\beta x}]$	 <p>Модуль соединения MC1</p>			
3.2	$[q_{\alpha z}; P]$	3.14	$[q; P_{\beta y}]$				
3.3	$[q; P_{\alpha y}]$	3.15	$[q; P_{\beta z}]$				
3.4	$[q_{\alpha y}; P]$	3.16	$[q_{\beta z}; P_{\beta z}]$				
3.5	$[q_{\alpha x}; P]$	3.17	$[q_{\beta x}; P_{\beta x}]$	3.25	$[q_{\alpha y}; P_{\beta x}]$		
3.6	$[q; P_{\alpha x}]$	3.18	$[q_{\beta y}; P_{\beta y}]$	3.26	$[q_{\alpha x}; P_{\beta z}]$		
3.7	$[q_{\alpha z}; P_{\alpha z}]$	3.19	$[q_{\beta x}; P_{\alpha y}]$	3.27	$[q_{\alpha y}; P_{\beta z}]$		
3.8	$[q_{\alpha y}; P_{\alpha y}]$	3.20	$[q_{\beta y}; P_{\alpha x}]$	3.28	$[q_{\beta y \alpha x}; P]$		
3.9	$[q_{\alpha x}; P_{\alpha x}]$	3.21	$[q_{\beta z}; P_{\alpha x}]$	3.29	$[q; P_{\beta y \alpha z}]$		
3.10	$[q_{\beta x}; P]$	3.22	$[q_{\beta z}; P_{\alpha y}]$	3.30	$[q_{\beta y \alpha x}; P_{\alpha x}]$		
3.11	$[q_{\beta y}; P]$	3.23	$[q_{\beta z}; P_{\alpha z}]$	3.31	$[q_{\alpha z}; P_{\beta y \alpha z}]$		
3.12	$[q_{\beta z}; P]$	3.24	$[q_{\alpha x}; P_{\beta y}]$	3.32	$[q; P_{\beta y \alpha x}]$		

После анализа кинематических схем сборки, представленных в табл. 1, можно обнаружить ряд совпадений кинематических схем для различных модулей соединений. Так обнаружены следующие идентичные схемы:

$$\begin{array}{ll}
 1.1 - 3.20: [q_{\beta y}; P_{\alpha x}] & 1.5 - 2.2: [q; P_{\alpha x \beta x}] \\
 1.2 - 3.24: [q_{\alpha x}; P_{\beta y}] & 1.16 - 2.3: [q_{\alpha x}; P_{\beta x}] \\
 1.7 - 3.30: [q_{\alpha x \beta y}; P_{\alpha x}] & 1.7 - 2.4: [q_{\alpha x \beta y}; P_{\alpha x}] \\
 1.13 - 3.6: [q; P_{\alpha x}] & 1.10 - 2.6: [q_{\alpha x \beta x}; P_{\alpha x}] \\
 1.14 - 3.5: [q_{\alpha x}; P] & 1.12 - 2.7: [q_{\alpha x \beta x}; P_{\alpha x \beta x}] \\
 1.4 - 3.32: [q; P_{\alpha x \beta y}] & \\
 1.6 - 2.1: [q_{\alpha x \beta x}; P] &
 \end{array}$$

После проведенного анализа можно сделать вывод о возможности сборки разных по типу и геометрии модулей соединения на одном оборудовании при использовании выделенных в процессе анализа идентичных схем. Это дает возможность объединять разнородные изделия в группы, переходить к большей серийности выпуска и использовать для сборки автоматическое оборудование.

Проектирование технологической системы ведется на основе кинематической схемы, в соответствии с которой элементы технологической системы и их составные части в процессе осуществления сборки перемещаются друг относительно друга. При исследовании процессов сборки изделий и при математическом описании пространственных отношений элементов технологической системы возникает проблема, связанная с описанием движения собираемых изделий. Эту проблему можно решать с помощью аффинных преобразований пространства [3–5].

Для описания процесса сборки необходимо привести системы координат собираемых деталей, блока технологического воздействия (БТВ) и сборочного ротора к одной. Рассмотрим технологическую систему «собираемые детали – БТВ». Изменяющиеся во времени (при движении) координаты точек поверхностей собираемых деталей имеют вид следующего вектор-столбца:

$$r_o = \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ t_o \end{pmatrix},$$

где x_o, y_o, z_o – однородные координаты любой точки поверхности собираемой детали в системе координат детали;

t_o – функция времени.

Для приведения системы координат деталей к системе БТВ можно применить аффинные преобразования пространства. В аналитическом виде переход от системы координат детали к системе координат БТВ можно описать выражением:

$$r_{o\text{БТВ}} = A_{\text{бтв}} \cdot r_o,$$

где $A_{\text{бтв}}$ – матрица перехода от системы координат i -ой детали к системе координат БТВ.

Технологическое движение сборки может состоять из одного (частный случай) или нескольких движений, обусловленных видом собираемого соединения и кинематической схемой сборки. Сложное движение, состоящее из ротации и трансляции, можно описать следующей матрицей:

$$A_{\delta m \varepsilon} = A_{ox} \cdot A_{oy} \cdot A_{oz} \cdot A_{xmm} \cdot A_{ymm} \cdot A_{zmm},$$

где A_{ox} , A_{oy} , A_{oz} – матрицы перехода, описывающие ротации вдоль соответствующих осей;

A_{xmp} , A_{ymp} , A_{zmp} – матрицы перехода, описывающие трансляции вдоль соответствующих осей.

Составим матрицы перехода для описания движений вдоль осей для каждой детали в собираемом соединении. Трансляции вдоль осей будут описаны матрицами (1–3), а ротации – матрицами перехода (4–6).

Трансляции вдоль осей для соответствующих деталей:

$$Aq_{xmp} = \begin{pmatrix} Rq \cdot \cos \delta \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad Ap_{xmp} = \begin{pmatrix} Rp \cdot \cos \vartheta \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$Aq_{ymp} = \begin{pmatrix} 0 \\ Rq \cdot \cos \psi \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad Ap_{ymp} = \begin{pmatrix} 0 \\ Rp \cdot \cos \zeta \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$Aq_{zmm} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Rq \cdot \cos \omega \\ 1 \end{pmatrix}, \quad Ap_{zmm} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Rp \cdot \cos \varepsilon \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Ротации:

$$Aq_{ox} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & \cos \mu & -\sin \mu & b \\ 0 & \sin \mu & \cos \mu & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad Ap_{ox} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma & f \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma & k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$Aq_{oy} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad Ap_{oy} = \begin{pmatrix} \cos \eta & 0 & -\sin \eta & d \\ 0 & 1 & 0 & f \\ \sin \eta & 0 & \cos \eta & k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$Aq_{oz} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 & a \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad Ap_{oz} = \begin{pmatrix} \cos \tau & -\sin \tau & 0 & d \\ \sin \tau & \cos \tau & 0 & f \\ 0 & 0 & 1 & k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

где α, β, μ – углы Эйлера для базовой детали;
 γ, η, τ – углы Эйлера для присоединяемой детали;
 R_i – длина вектора перехода при трансляции из систем координат деталей в систему координат БТВ;
 δ, ψ, ω – углы переноса, определяющие направление перехода для базовой детали;
 $\theta, \zeta, \varepsilon$ – углы переноса, определяющие направление перехода для присоединяемой детали;
 a, b, c – координаты начала координат системы базовой детали в системе БТВ;
 d, f, k – координаты начала координат системы присоединяемой детали в системе БТВ.
 Тогда сложное движение для каждой пары выявленных выше идентичных схем будет иметь вид, представленный в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения матриц, описывающих сложное движение при переходе из систем координат деталей в систему координат БТВ

Кинематическая схема	Матрица перехода из систем координат деталей в систему координат БТВ
1.1– 3.20: $[q_{\beta y}; p_{\alpha x}]$	$A_{\delta m \varepsilon} = Aq_{oy} \cdot Ap_{xmm} = \begin{pmatrix} \cos(\beta) \cdot Rp \cdot \cos(\theta) + a \\ b \\ \sin(\beta) \cdot Rp \cdot \cos(\theta) + c \\ 1 \end{pmatrix}$
1.2 – 3.24: $[q_{\alpha x}; p_{\beta y}]$	$A_{\delta m \varepsilon} = Aq_{xmm} \cdot Ap_{oy} = \begin{pmatrix} \cos(\eta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + d \\ f \\ \sin(\eta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.7 – 3.30: $[q_{\alpha x \beta y}; p_{\alpha x}]$	$A_{\delta m \varepsilon} = Aq_{xmm} \cdot Ap_{oy} = \begin{pmatrix} \cos(\eta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + d \\ f \\ \sin(\eta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.13 – 3.6: $[q; p_{\alpha x}]$	$A_{\delta m \varepsilon} = Ap_{xmp} = \begin{pmatrix} Rp \cdot \cos(\theta) \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
1.14 – 3.5: $[q_{\alpha x}; p]$	$A_{\delta m \varepsilon} = Aq_{xmp} = \begin{pmatrix} Rq \cdot \cos(\delta) \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
1.4 – 3.32: $[q; p_{\alpha x \beta y}]$	$A_{\delta m \varepsilon} = Ap_{xmp} \cdot Ap_{oy} = \begin{pmatrix} \cos(\eta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + d \\ f \\ \sin(\eta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + k \\ 1 \end{pmatrix}$

Продолжение таблицы 2

1.6 – 2.1: [$q_{\alpha x \beta x}; p$]	$A_{\delta m \epsilon} = Aq_{xmp} \cdot Aq_{ox} =$	$\begin{pmatrix} Rq \cdot \cos(\delta) + a \\ b \\ c \\ 1 \end{pmatrix}$
1.5 – 2.2: [$q; p_{\alpha x \beta x}$]	$A_{\delta m \epsilon} = Ap_{xmp} \cdot Ap_{ox} =$	$\begin{pmatrix} Rp \cdot \cos(\theta) + d \\ f \\ k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.16 – 2.3: [$q_{\alpha x}; p_{\beta x}$]	$A_{\delta m \epsilon} = Aq_{xmp} \cdot Ap_{ox} =$	$\begin{pmatrix} Rq \cdot \cos(\delta) + d \\ f \\ k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.7 – 2.4: [$q_{\alpha x \beta y}; p_{\alpha x}$]	$A_{\delta m \epsilon} = Aq_{xmp} \cdot Aq_{oy} \cdot$ $\cdot Ap_{ox} =$	$\begin{bmatrix} \cos(\beta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + a + d \\ \cos(\gamma) \cdot b - \sin(\gamma) \cdot (\sin(\beta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + c) + f \\ \sin(\gamma) \cdot b + \cos(\gamma) \cdot (\sin(\beta) \cdot Rq \cdot \cos(\delta) + c) + k \\ 1 \end{bmatrix}$
1.10 – 2.6: [$q_{\alpha x \beta x}; p_{\alpha x}$]	$A_{\delta m \epsilon} = Aq_{xmp} \cdot Aq_{ox} \cdot$ $\cdot Ap_{ox} =$	$\begin{pmatrix} Rq \cdot \cos(\delta) + d + a \\ \cos(\gamma) \cdot b - \sin(\gamma) \cdot c + f \\ \sin(\gamma) \cdot b + \cos(\gamma) \cdot c + k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.12 – 2.7: [$q_{\alpha x \beta x}; p_{\alpha x \beta x}$]	$A_{\delta m \epsilon} = Aq_{xmp} \cdot Aq_{ox} \cdot$ $\cdot Ap_{ox} \cdot Ap_{xmm} =$	$1 + (Rq \cdot \cos(\delta) + a) \cdot (Rp \cdot \cos(\theta) + a) + b^2 + c^2$

Следующим этапом моделирования процесса сборки при помощи аффинных преобразований координат будет переход от системы координат БТВ к системе координат ротора. В процессе работы, в зависимости от компоновки ротора, БТВ может осуществлять одновременно следующие движения: ротацию вокруг оси ротора и трансляцию вдоль этой оси (см. рис. 1).

Трансляция вдоль оси *OZ* ротора будет описана следующей матрицей перехода:

$$A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ R \cdot \cos \phi \\ 1 \end{pmatrix},$$

где *R* – длина вектора перехода при трансляции из систем координат БТВ в систему координат ротора;

ϕ – угол переноса, определяющий направление перехода.

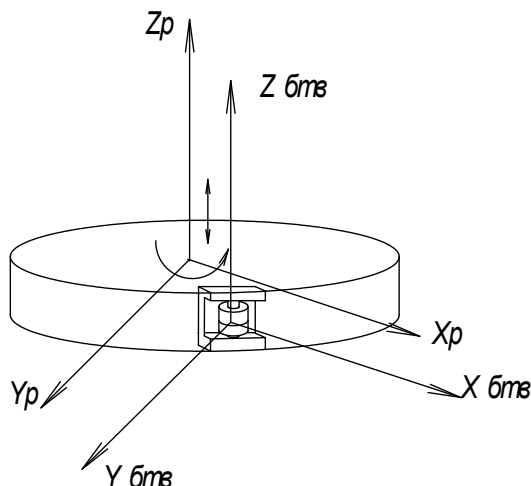


Рис. 1. Схема систем координат системы БТВ – ротор

Ротация вдоль оси OZ ротора:

$$A_{oz} = \begin{pmatrix} \cos \rho & -\sin \rho & 0 & a \\ \sin \rho & \cos \rho & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где ρ – углы Эйлера;

a, b, c – координаты начала координат системы БТВ в системе ротора.

Сложное движение, которое БТВ может осуществлять в роторе, описывается матрицей:

$$A_{ром} = A \cdot A_{oz} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ R \cdot \cos(\phi) + c \\ 1 \end{pmatrix}. \tag{7}$$

ВЫВОДЫ

Таким образом, с помощью выражений (1)–(6) можно описать последовательный переход от систем координат деталей к системе координат БТВ и от системы координат БТВ к системе координат ротора, а при помощи выражения (7) описать сложное движение БТВ в роторе. Полученные выражения позволяют определить аналитически положения БТВ и находящихся в нем собираемых деталей в системе координат ротора в любой момент времени, что позволит создать системы контроля над процессом сборки и снизить количество отказов системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А. Н. Разработка методов проектирования высокоэффективных поточно-пространственных технологических систем: дис. ... д-ра техн. наук / А. Н. Михайлов. – Харьков : ХПИ, 1992. – 498 с.
2. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 2001. – 368 с.
3. Александров П. С. Лекции по аналитической геометрии / П. С. Александров. – М. : Наука, 1968. – 912 с.
4. Перепелица Б. А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием / Б. А. Перепелица. – Харьков : Вища школа; Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 152 с.
5. Новиков М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов / М. П. Новиков. – М. : Машиностроение, 1980. – 592 с.

Статья поступила в редакцию 24.10.2011 г.