УДК 621. 923

О.О Кульбида., А.Л. Ищенко, Л.Н. Феник, Е.А. Понамарева
Донецкий национальный технический университет, Украина
Тел./Факс: +38(062) 3010804; E-mail: olga_kulbida@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ В АВТОМАТИЧЕСКОМ СБОРОЧНОМ РОТОРЕ

В работе проведен анализ кинематических схем сборки, на основании которого возможна сборка 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 с идентичными кинематическими схемами. 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.
Ключевые слова: *кинематическая схема, модуль соединения, матрица перехода, модель процесса сборки*

Введение

Современный уровень развития машиностроения предполагает уменьшение количества ручного труда и увеличение количества автоматизированных производственных процессов. На сегодняшний день процессы механической обработки автоматизированы достаточно широко, процессы сборки в силу сложности реализации и многономенклатурности соединений слабо охвачены этом процессом. Механизация в сборке составляет 40%, а автоматизация всего 5...6%. Поэтому остро встает задача создания автоматических сборочных систем обладающих достаточной гибкостью при переходе на другую номенклатуру собираемых изделий и обладающих высокой производительностью для уменьшения себестоимости изделия. С этой задачей успешно могут справляться сборочные автоматы роторного типа.

Работа технологической системы – сборочного ротора, состоящей из нескольких технологических модулей – блоков технологического воздействия (БТВ), основана на совмещении технологических и транспортных движений. Состав и геометрические свойства механического движения модулей системы в процессе выполнения технологического процесса сборки описывают кинематические схемы. Создание конкретных вариантов технологических систем и их модулей невозможно без разработки принципиальных кинематических схем и учета геометрических параметров собираемых элементов. Это связано с тем, что в модели построения технологической системы [1-4] необходимо задание пространственных отношений. Пространственные отношения характеризуют взаимное положение элементов системы и положение их составных частей в пространстве и друг относительно друга. Эти отношения задаются математическими функциями, которые определяют детерминированные связи между элементарными движениями в кинематических схемах технологических систем.

Цель проводимого исследования можно обозначить как разработку математической модели процесса сборки в автоматическом сборочном роторе. Для реализации поставленной цели необходимо решение ряда задач: анализ кинематических схем сборки с использованием модульного принципа для выделения идентичных схем для различных модулей соединения; описание сложного движения деталей и БТВ в системе координат ротора для выделенных схем сборки.

Основное содержание и результаты работы

Представляет интерес сопоставить кинематику типовых соединений, рассматриваемых в теории взаимозаменяемости и технических измерений. Используем модульный принцип, предложенный проф. Базровым Б.М. Согласно [5] 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.

Рассмотрим кинематику наиболее распространенных модулей соединений: соединение по плоским поверхностям (МС1), резьбовые цилиндрические соединения (МС2) и цилиндрические гладкие 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– α и ротацию – β вдоль соответствующих осей. Для удобства представления информации результаты анализа сведем в таблицу 1.

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

1.1 – 3.20: $\left[q_{\beta y};p_{\alpha x}\right]$,

1.2 – 3.24: $\left[q_{\alpha x};p_{\beta y}\right]$,

1.7 – 3.30: $\left[q_{\alpha x\beta y};p_{\alpha x}\right]$,

1.13 – 3.6: $\left[q;p_{\alpha x}\right]$,

1.14 – 3.5: $\left[q_{\alpha x};p\right]$,

1.4 – 3.32: $\left[q;p_{\alpha x\beta y}\right]$,

1.6 – 2.1: $\left[q_{\alpha x\beta x};p\right]$,

1.5 – 2.2: $\left[q;p_{\alpha x\beta x}\right]$,

1.16 – 2.3: $\left[q_{\alpha x};p_{\beta x}\right]$,

1.7 – 2.4: $\left[q_{\alpha x\beta y};p_{\alpha x}\right]$,

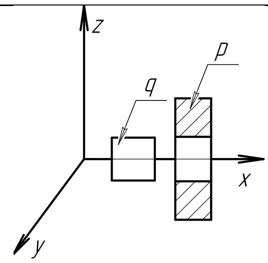
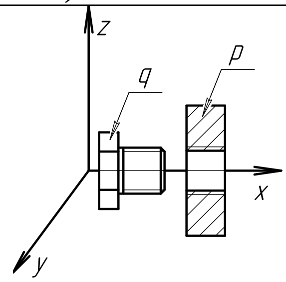
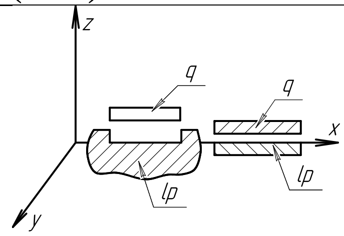
1.10 – 2.6: $\left[q_{\alpha x\beta x};p_{\alpha x}\right]$,

1.12 – 2.7: $\left[q_{\alpha x\beta x};p_{\alpha x\beta x}\right]$.

Таблица 1. Варианты кинематических схем сборки

1. Цилиндрические соединения (МС4):					
1.1	$\left[q_{\beta y};p_{\alpha x}\right]$	1.8	$\left[q_{\alpha x};p_{\alpha x\beta y}\right]$	1.15	$\left[q_{\alpha x};p_{\alpha x}\right]$
1.2	$\left[q_{\alpha x};p_{\beta y}\right]$	1.9	$\left[q_{\alpha x\beta y};p_{\alpha x\beta y}\right]$	1.16	$\left[q_{\alpha x};p_{\beta x}\right]$
1.3	$\left[q_{\alpha x\beta y};p\right]$	1.10	$\left[q_{\alpha x\beta x};p_{\alpha x}\right]$	1.17	$\left[q_{\beta x};p_{\alpha x}\right]$

Продолжение таблицы 1

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	$[q_{\alpha x\beta x};p_{\alpha x\beta x}]$		
1.6	$[q_{\alpha x\beta x};p]$	1.13	$[q;p_{\alpha x}]$		
1.7	$[q_{\alpha x\beta y};p_{\alpha x}]$	1.14	$[q_{\alpha x};p]$	Рис. 1. Модуль соединения МС4	
2. Соединение с цилиндрической резьбой (МС2):					
2.1	$[q;p_{\alpha x\beta x}]$	2.5	$[q_{\alpha x};p_{\alpha x\beta x}]$		
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	$[q_{\beta x};p_{\alpha x}]$			Рис. 2. Модуль соединения МС2	
3. Соединение по плоским поверхностям (МС1)					
3.1	$[q;p_{\alpha z}]$	3.13	$[q;p_{\beta x}]$		
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	$[q_{\beta z};p_{\beta z}]$	Рис. 3. Модуль соединения МС1	
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 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, работающее по идентичным кинематическим схемам.

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 [2-4].

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:

$$\bar{r}_o = \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \\ 1 \end{pmatrix},$$

где x_o, y_o, z_o - однородные координаты любой точки поверхности собираемой детали в системе координат детали.

В аналитическом виде переход от системы координат детали к системе координат БТВ можно описать выражением:

$$r_{o_{БТВ}} = A_{бтв} \cdot \bar{r}_o ,$$

где $A_{бтв}$ - 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:

$$A_{бтв} = A_{ox} \cdot A_{oy} \cdot A_{oz} \cdot A_{xтр} \cdot A_{yтр} \cdot A_{zтр} ,$$

где *Aox*, *Aoy*, *Aoz* – матрицы перехода, описывающие ротации вдоль соответствующих осей;

$A_{xтр}$, $A_{yтр}$, $A_{zтр}$ – 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:

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

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

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

Ротации:

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

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

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

где α, β, μ - углы Эйлера для базовой детали;
γ, η, τ - углы Эйлера для присоединяемой детали;
Ri – длина вектора перехода при трансляции из систем координат деталей в систему координат БТВ;
δ, ψ, ω - углы поворота, определяющие направление перехода для базовой детали;
θ, ς, ε - углы поворота, 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 таблице 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. 4).

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: $\left[q_{\beta y};p_{\alpha x}\right]$	$A_{бтв} = Aq_{oy} \cdot Ap_{xmp} = \begin{pmatrix} \cos(\beta)\cdot Rp\cdot\cos(\theta) + a \\ b \\ \sin(\beta)\cdot Rp\cdot\cos(\theta) + c \\ 1 \end{pmatrix}$
1.2 – 3.24: $\left[q_{\alpha x};p_{\beta y}\right]$	$A_{бтв} = Aq_{xmp} \cdot Ap_{oy} = \begin{pmatrix} \cos(\eta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + d \\ f \\ \sin(\eta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.7 – 3.30: $\left[q_{\alpha x\beta y};p_{\alpha x}\right]$	$A_{бтв} = Aq_{xmp} \cdot Ap_{oy} = \begin{pmatrix} \cos(\eta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + d \\ f \\ \sin(\eta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.13 – 3.6: $\left[q;p_{\alpha x}\right]$	$A_{бтв} = Ap_{xmp} = \begin{pmatrix} Rp\cdot\cos(\theta) \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
1.14 – 3.5: $\left[q_{\alpha x};p\right]$	$A_{бтв} = Aq_{xmp} = \begin{pmatrix} Rq\cdot\cos(\delta) \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
1.4 – 3.32: $\left[q;p_{\alpha x\beta y}\right]$	$A_{бтв} = Ap_{xmp} \cdot Ap_{oy} = \begin{pmatrix} \cos(\eta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + d \\ f \\ \sin(\eta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.6 – 2.1: $\left[q_{\alpha x\beta x};p\right]$	$A_{бтв} = Aq_{xmp} \cdot Aq_{ox} = \begin{pmatrix} Rq\cdot\cos(\delta) + a \\ b \\ c \\ 1 \end{pmatrix}$
1.5 – 2.2: $\left[q;p_{\alpha x\beta x}\right]$	$A_{бтв} = Ap_{xmp} \cdot Ap_{ox} = \begin{pmatrix} Rp\cdot\cos(\theta) + d \\ f \\ k \\ 1 \end{pmatrix}$

Продолжение таблицы 2

1.16 – 2.3: $\left[q_{\alpha x};p_{\beta x}\right]$	$A_{бтв} = Aq_{xmp} \cdot Ap_{ox} = \begin{pmatrix} Rq\cdot\cos(\delta) + d \\ f \\ k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.7 – 2.4: $\left[q_{\alpha\beta y};p_{\alpha x}\right]$	$A_{бтв} = Aq_{xmp} \cdot Aq_{oy} \cdot Ap_{ox} = \begin{bmatrix} \cos(\beta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + a + d \\ \cos(\gamma)\cdot b - \sin(\gamma)\cdot(\sin(\beta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + c) + f \\ \sin(\gamma)\cdot b + \cos(\gamma)\cdot(\sin(\beta)\cdot Rq\cdot\cos(\delta) + c) + k \\ 1 \end{bmatrix}$
1.10 – 2.6: $\left[q_{\alpha\beta x};p_{\alpha x}\right]$	$A_{бтв} = Aq_{xmp} \cdot Aq_{ox} \cdot Ap_{ox} = \begin{pmatrix} Rq\cdot\cos(\delta) + d + a \\ \cos(\gamma)\cdot b - \sin(\gamma)\cdot c + f \\ \sin(\gamma)\cdot b + \cos(\gamma)\cdot c + k \\ 1 \end{pmatrix}$
1.12 – 2.7: $\left[q_{\alpha\beta x};p_{\alpha\beta x}\right]$	$A_{бтв} = Aq_{xmp} \cdot Aq_{ox} \cdot$ $\cdot Ap_{ox} \cdot Ap_{xmp} =$ $1 + (Rq\cdot\cos(\delta) + a)\cdot(Rp\cdot\cos(\vartheta) + a) + b^2 + c^2$

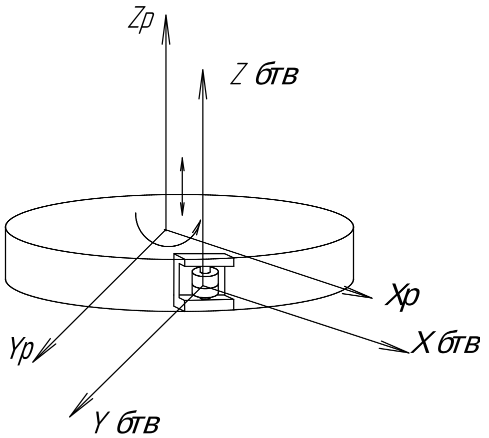


Рис.4. Схема систем координат системы БТВ – ротор

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 поворота, определяющий направление перехода.

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:

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

Заключение

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 за процессом сборки и снизить количество отказов в системы.

Список литературы:

1. Михайлов А.Н. Основы синтеза поточно-пространственных технологических систем непрерывного действия / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – 379 с.

2. Александров П.С. Лекции по аналитической геометрии / П.С. Александров. – М.: Наука, 1968. – 912 с.

3. Перепелица Б.А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием / Б.А. Перепелица. – Х.: Вища школа, Изд-во при Харьк. Ун-те, 1981. – 152 с.

4. Новиков М.П. Основы технологии сборки машин и механизмов / М.П. Новиков. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.

5. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.

Надійшла до редколегії 10.02.2012.

О.О. Кульбіда, О.Л. Іщенко, Л.М. Фенік, О.О. Понамарьова

ВИКОРИСТАННЯ МОДУЛЬНОГО ПРИНЦИПУ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ РУХІВ У ПРОЦЕСІ СКЛАДАННЯ В АВТОМАТИЧНОМУ СКЛАДАЛЬНОМУ РОТОРІ

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 в системи.

Ключеві слова: *кінематична схема, модуль з'єднання, матриця переходу, модель процесу складання.*

O. Kulbida, A. Ishchenko, L. Fenik, E. Ponamareva

USING OF MODULE PRINCIPLE FOR DESIGN OF MOTIONS IN THE PROCESS OF ASSEMBLING IN AUTOMATIC ROTOR

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

Keywords: *kinematics, module connection, the transition matrix, the model assembly process.*