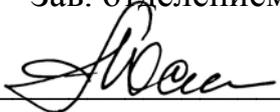


Министерство образования и науки российской федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

Утверждаю  
Зав. отделением каф. ЮНЕСКО

 Ю.М. Осипов

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **МУЛЬТИКООРДИНАТНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ДВИЖЕНИЯ**

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: **«Мультикоординатные электромехатронные системы движения»** для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 «Мехатроника и робототехника» по магистерской программе «Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения»



Томск 2012

УДК 621.396.6.671.7

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: «Мультикоординатные электромехатронные системы движения» для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 «Мехатроника и робототехника» по магистерской программе «Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных систем движения». – Томск: Изд-во ТУСУР, 2012. – 55 с.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром отделения кафедры ЮНЕСКО  
«31» августа 2011 г.

Составитель к.т.н., доц. \_\_\_\_\_ С.В. Щербинин

Зав. кафедрой ОКЮ  
доктор техн. наук,  
доктор экон. наук  
профессор

 Ю.М. Осипов

*Рецензент*  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры МиГ ЮТИ ТПУ  
*И.Ф. Боровиков*

## **Введение**

Рыночной экономике России необходимы конкурентоспособные технологии и оборудование, созданные в соответствии с Перечнем критических технологий федерального уровня Пр-842 от 21 мая 2006 года по направлению «Мехатронные технологии и микросистемная техника» на основе:

мехатронных модулей и узлов вращательных и линейных перемещений с заданными технологическими функциями для конкретных машин;

машин нового поколения традиционной и нетрадиционной компоновки (на базе мехатронных модулей движения и мехатронных узлов) для формирования поверхностей машиностроительных изделий сложной пространственной формы, а также для формирования поверхностного слоя изделий с заранее заданными свойствами в микро- и нанoeлектронике с использованием электронных, фотонных и ионно-плазменных технологий.

### **1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ**

Целью занятий является формирование знаний по элементам теории и расчета мультикоординатных электромехатронных систем движения (МЭСД).

Задачи являются:

- 1) изучение условий для обеспечения качественного функционирования МЭСД;
- 2) ознакомление с практическим применением МЭСД.

### **2. ЗАДАНИЕ**

Изучить методические указания. Ответить на контрольные вопросы в конце каждого раздела методических указаний.

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

#### **3.1. Математические модели двухиндукторных систем с ДЭМД**

Двухиндукторная (двухмассовая) система с ДЭМД обеспечивает перемещение по одной вращательной координате относительно оси  $X$ . Массы подвижных элементов конструкции дуговых ДЭМД взаимно уравновешивают друг друга, кинематическая схема представлена на рис. 1 [31].

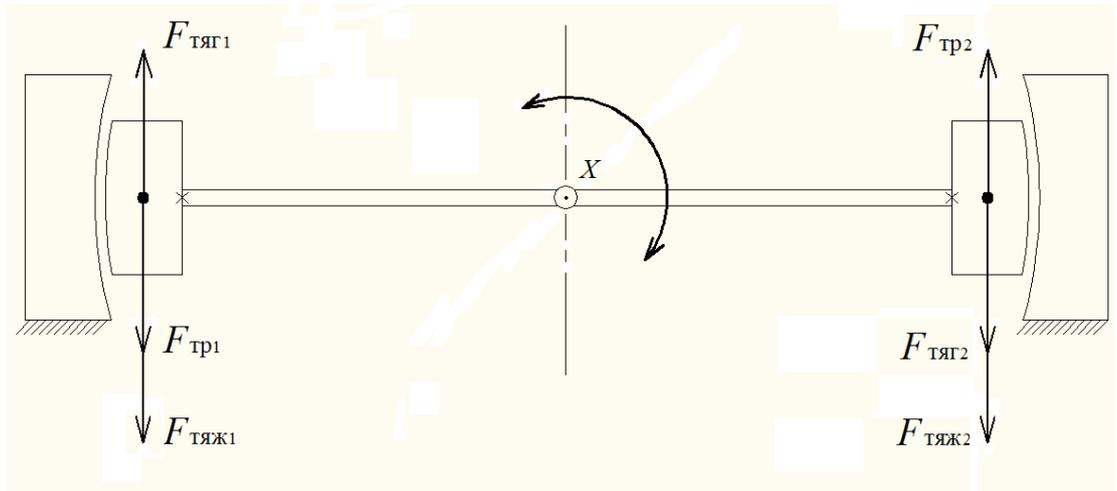


Рис. 1. Кинематическая схема двухиндукторной (двухмассовой) системы

В идеально уравновешенной системе обеспечивается условие равенства сил  $F_{тяж1} = F_{тяж2}$ . В этом случае сумма сил, действующих на подвижные части двухмассовой системы (ДС) не зависит от направления их движения. В реальной системе всегда присутствует остаточная неуравновешенность  $\Delta m$ . Вследствие этого, картина распределения сил будет зависеть от направления движения подвижных элементов, а величина переменной составляющей силы определится:

$$F_{н.ур} = \Delta m \cdot g \cdot e_{x,y,z} \cdot \text{sign} R \frac{d\varphi}{dt}, \quad (1)$$

где  $\Delta m$  – величина остаточной неуравновешенности масс подвижных элементов системы;  $g$  – ускорение свободного падения;  $e_{x,y,z}$  – эксцентриситет между центром тяжести подвижных элементов и осью вращения  $X$ ;  $R \frac{d\varphi}{dt}$  – скорость движения подвижных элементов системы.

С учетом (1) процесс движения ДС на основе ДЭМД может быть описан следующим уравнением:

$$(m_1 + m_2) \cdot R \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k_{тр} \cdot R \frac{d\varphi}{dt} + \Delta m \cdot g \cdot e_{x,y,z} \cdot \text{sign} R \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{2} (I\omega)_{\delta}^2 \cdot \frac{dG}{d\xi} \quad (2)$$

где  $m_1$  – масса подвижной части ДЭМД1;  $m_2$  – масса подвижной части ДЭМД2;  $R \frac{d\varphi}{dt^2}$  – ускорение вращательного движения элементов;  $k_{тр}$  – коэффициент вязкого трения в опорах дуговых модулей;  $(I\omega)_{\delta}^2$  – намагничивающая сила, необходимая

для проведения магнитного потока через воздушный зазор электромагнитной системы ДЭМД;  $\frac{dG}{d\xi}$  – скорость изменения величины магнитной проводимости воздушного зазора ДЭМД в зависимости от взаимного смещения статор-ротор.

Правая часть уравнения (2) характеризует собой электромагнитное усилие, развиваемое электродвигателями ДЭМД1 и ДЭМД2 и определяемое величинами токов в обмотках индукторов и параметром  $\frac{dG}{d\xi}$ .

На рис. 2. представлена схема электрическая принципиальная двухиндукторной системы с ДЭМД. Для решения задачи определения значений токов в обмотках индукторов ДЭМД в функции времени воспользуемся методом переменных состояния.

В соответствии с этим методом составляются уравнения электромагнитного состояния — система уравнений, определяющих режим работы (состояние) электрической цепи. Метод переменных состояния основывается на упорядоченном составлении и решении системы дифференциальных уравнений первого порядка, которые разрешены относительно производных, т.е. записаны в виде, наиболее удобном для применения численных методов интегрирования, реализуемых средствами вычислительной техники.

Для получения математической модели электрической части двухиндукторной системы воспользуемся ее упрощенной схемой замещения (рис. 3.3.), в которой трехфазный мостовой инвертор, осуществляющий коммутацию токов в обмотки индукторов ДЭМД представлен с помощью идеальных ключей. Процессами, характеризующими работу реального ключевого устройства пренебрежем с целью упрощения модели. Будем считать, что переключение ключей  $K1 - K6$  (рис. 3.) происходит мгновенно, при этом ключу в замкнутом состоянии будет соответствовать сопротивление на данном участке цепи  $RKn \rightarrow 0$ , ключу в разомкнутом состоянии —  $RKn \rightarrow \infty$ .

При расчете методом переменных состояния, необходимо составить систему алгебраических уравнений, связывающих искомые величины с переменными состояния и источниками внешних воздействий. Таким образом, система уравнений в матричной форме записи имеет вид:

$$X' = AX + BU, \quad (3)$$

где  $X$  – матрица переменных состояния;  $X'$  – матрица первых производных переменных состояния по времени;  $U$  – матрица источников внешних воздействий;  $A$  – матрица параметров (матрица Якоби);  $B$  – матрица связи между источниками и переменными состояния.

Матрица параметров  $A$  имеет размерность  $n \times n$ , где  $n$  – число переменных состояния, размерность матрицы связи  $B$  —  $n \times t$ , где  $t$  – число источников.

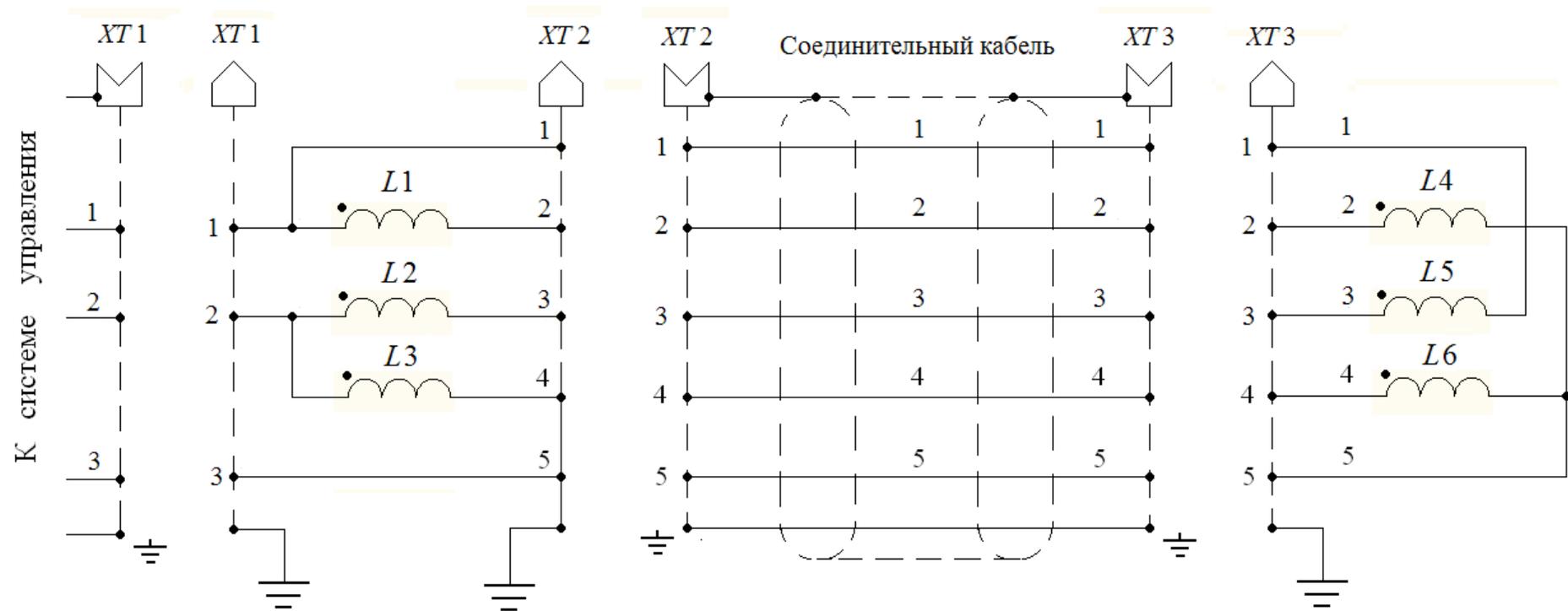


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная двухиндукторной системы с ДЭМД

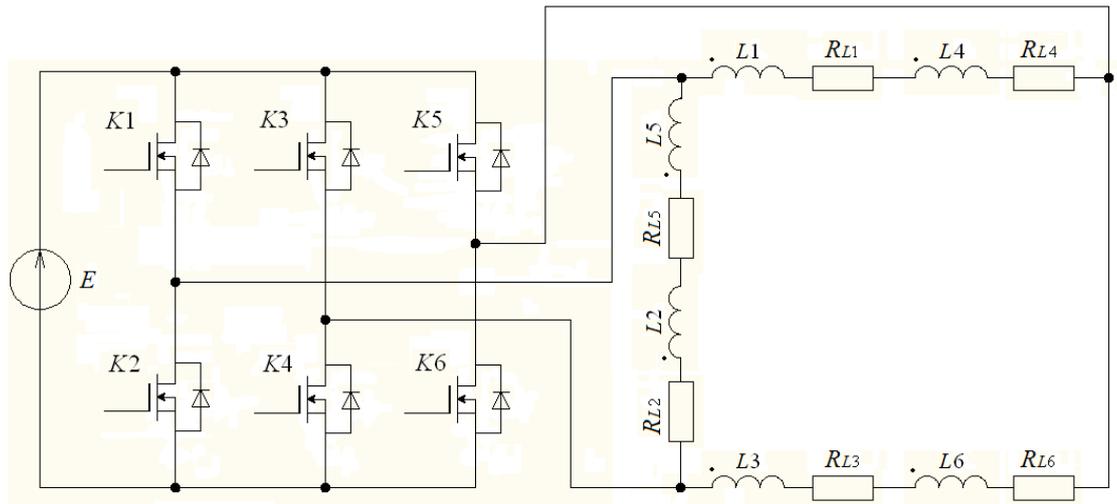


Рис. 3. Упрощенная схема замещения электрической части двухиндукторной системы с ДЭМД

Преобразуем схему замещения (рис.3) к виду, наиболее удобному для составления уравнений токов цепи. При этом:

$$L1_{\text{э}} = L1 + L4; \quad L2_{\text{э}} = L2 + L5; \quad L3_{\text{э}} = L3 + L6; \quad R_{L1_{\text{э}}} = R_{L1} + R_{L4};$$

$$R_{L2_{\text{э}}} = R_{L2} + R_{L5}; \quad R_{L3_{\text{э}}} = R_{L3} + R_{L6}.$$

Схема замещения после преобразования представлена на рис. 3.4.

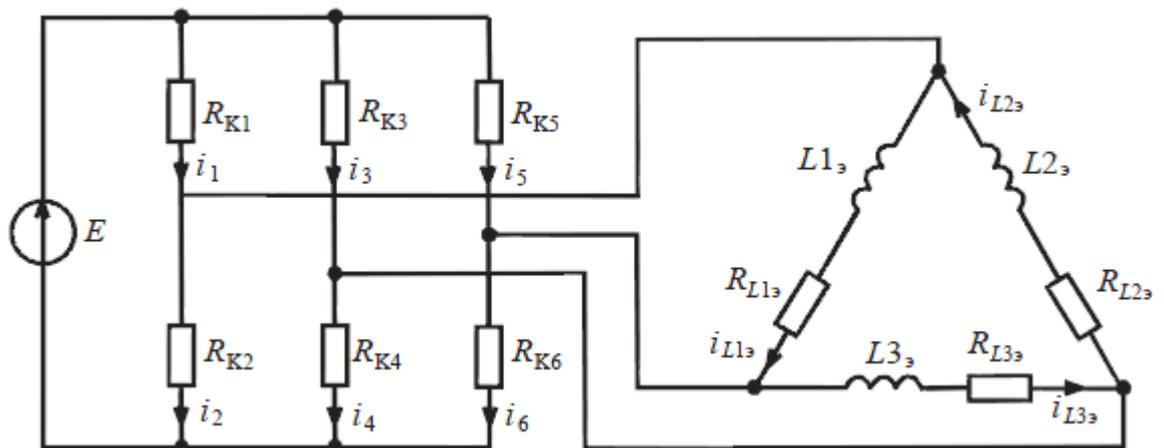


Рис. 4. Упрощенная схема замещения электрической части двухиндукторной системы с ДЭМД после преобразований

В соответствии с условиями, принятыми выше, ключевые элементы на схеме замещения заменены резистивными элементами, с параметрами, изменяемыми от  $RKn \rightarrow 0$ , до  $RKn \rightarrow \infty$  по команде управления. Участки цепи с

последовательным соединением индуктивных и резистивных элементов (рис. 3.) преобразованы в эквивалентные им.

Составим для полученной схемы уравнения по первому и второму закону Кирхгофа.

$$R_{K1} \cdot i_1 + L_{1э} \frac{di_{L1э}}{dt} + R_{L1э} \cdot i_{L1э} - R_{K5} \cdot i_5 = 0 \quad (4)$$

$$R_{K4} \cdot i_4 - R_{K6} \cdot i_6 + L_{3э} \frac{di_{L3э}}{dt} + R_{L3э} \cdot i_{L3э} = 0 \quad (5)$$

$$R_{K1} \cdot i_1 - L_{2э} \frac{di_{L2э}}{dt} - R_{L2э} \cdot i_{L2э} - R_{K3} \cdot i_3 = 0 \quad (6)$$

$$R_{K5} \cdot i_5 + R_{K6} \cdot i_6 = E \quad (7)$$

$$R_{K3} \cdot i_3 + R_{K4} \cdot i_4 = E \quad (8)$$

$$R_{K1} \cdot i_1 + R_{K2} \cdot i_2 = E \quad (9)$$

$$i_1 - i_2 - i_{L1э} + i_{L3э} = 0 \quad (10)$$

$$i_3 - i_4 + i_{L2э} - i_{L3э} = 0 \quad (11)$$

$$i_5 - i_6 + i_{L1э} - i_{L2э} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{cases}
\frac{di_{L1\vartheta}}{dt} = -\left(\frac{R_{K5} \cdot R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L1\vartheta} + \frac{R_{K1} \cdot R_{K2}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L1\vartheta} + \frac{R_{L1\vartheta}}{L1\vartheta}\right) \cdot i_{L1\vartheta} + \frac{R_{K5} \cdot R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L1\vartheta} \cdot i_{L2\vartheta} + \frac{R_{K1} \cdot R_{K2}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L1\vartheta} \cdot i_{L3\vartheta} + \left(\frac{R_{K5}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L1\vartheta} + \frac{R_{K1}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L1\vartheta}\right) \cdot E \\
\frac{di_{L2\vartheta}}{dt} = \frac{R_{K1} \cdot R_{K2}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L2\vartheta} \cdot i_{L1\vartheta} + \left(\frac{R_{K3} \cdot R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L2\vartheta} - \frac{R_{L2\vartheta}}{L2\vartheta}\right) \cdot i_{L2\vartheta} - \left(\frac{R_{K1} \cdot R_{K2}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L2\vartheta} + \frac{R_{K3} \cdot R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L2\vartheta}\right) \cdot i_{L3\vartheta} + \left(\frac{R_{K1}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L2\vartheta} + \frac{R_{K3}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L2\vartheta}\right) \cdot E \\
\frac{di_{L3\vartheta}}{dt} = \frac{R_{K5} \cdot R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L3\vartheta} \cdot i_{L1\vartheta} - \left(\frac{R_{K5} \cdot R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L3\vartheta} + \frac{R_{K3} \cdot R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L3\vartheta}\right) \cdot i_{L2\vartheta} + \left(\frac{R_{K3} \cdot R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L3\vartheta} - \frac{R_{L3\vartheta}}{L3\vartheta}\right) \cdot i_{L3\vartheta} + \left(\frac{R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L3\vartheta} + \frac{R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L3\vartheta}\right) \cdot E
\end{cases} \quad (13)$$

$$X' = \begin{bmatrix} \frac{di_{L1\vartheta}}{dt} \\ \frac{di_{L2\vartheta}}{dt} \\ \frac{di_{L3\vartheta}}{dt} \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_{K5} \cdot R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L1_{\vartheta}} + \frac{R_{K1} \cdot R_{K2}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L1_{\vartheta}} + \frac{R_{L1\vartheta}}{L1_{\vartheta}}\right) & \frac{R_{K5} \cdot R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L1_{\vartheta}} & \frac{R_{K1} \cdot R_{K2}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L1_{\vartheta}} \\ \frac{R_{K1} \cdot R_{K2}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L2_{\vartheta}} & \frac{R_{K3} \cdot R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L2_{\vartheta}} - \frac{R_{L2\vartheta}}{L2_{\vartheta}} & -\left(\frac{R_{K1} \cdot R_{K2}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L2_{\vartheta}} + \frac{R_{K3} \cdot R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L2_{\vartheta}}\right) \\ \frac{R_{K5} \cdot R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L3_{\vartheta}} & -\left(\frac{R_{K5} \cdot R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L3_{\vartheta}} + \frac{R_{K3} \cdot R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L3_{\vartheta}}\right) & \left(\frac{R_{K3} \cdot R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L3_{\vartheta}} - \frac{R_{L3\vartheta}}{L3_{\vartheta}}\right) \end{bmatrix};$$

(15)

$$X = \begin{bmatrix} i_{L1\vartheta} \\ i_{L2\vartheta} \\ i_{L3\vartheta} \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{R_{K5}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L1\vartheta} - \frac{R_{K1}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L1\vartheta} & \\ \frac{R_{K1}}{(R_{K1} + R_{K2}) \cdot L2\vartheta} - \frac{R_{K3}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L2\vartheta} & \\ \frac{R_{K6}}{(R_{K5} + R_{K6}) \cdot L3\vartheta} - \frac{R_{K4}}{(R_{K3} + R_{K4}) \cdot L3\vartheta} & \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$U = E; \quad (18)$$

Выполнив соответствующие преобразования уравнений 4 – 12 получим систему линейных дифференциальных уравнений относительно переменных состояния и входных переменных (13). Полученная система дифференциальных уравнений представляет собой математическую модель электрической части двухиндукторной системы, позволяющую определить токи в обмотках индукторов ДЭМД в функции времени. Для задания алгоритма переключения ключей инвертора, параметры  $R1 - R6$  должны изменяться в соответствии с функциями управления. Перейдя к матричной форме записи, в соответствии с 3 получим матрицы 14 – 18.

Решение полученной системы уравнений может производиться численными методами. Разработан целый ряд численных методов решения системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Выбор метода численного интегрирования может быть осуществлен исходя из требований точности, порядка аппроксимации, удобства, а также из соображений устойчивости. Наиболее распространенным методом является метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Данная численная схема характеризуется высокой точностью получаемых результатов и является условно-устойчивой, однако требует большой вычислительной мощности.

Необходимо теперь определить функции переключения ключей инвертора, т.е. функции, в соответствии с которыми будут изменять свои значения элементы математической модели  $R_{K1} - R_{K6}$ . Функции задаются в соответствии с принципом управления, применяемом в данном электроприводе.

Предположим, что реализован наиболее простой способ управления, при котором не происходит формирование синусоидальной формы тока в обмотках ДЭМД. Переключение ключей инвертора в этом случае, происходит в соответствии с алгоритмом, представленным на рис.5.

Запишем функции переключения ключей для данного способа управления. Для этого зададим гармоническую функцию с периодом, равным периоду переключения ключей:

$$F(t) = \sin(\omega_0 \cdot t + \Delta t), \quad (19)$$

где  $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f$  – частота,  $\Delta t$  – период изменения состояния ключей.

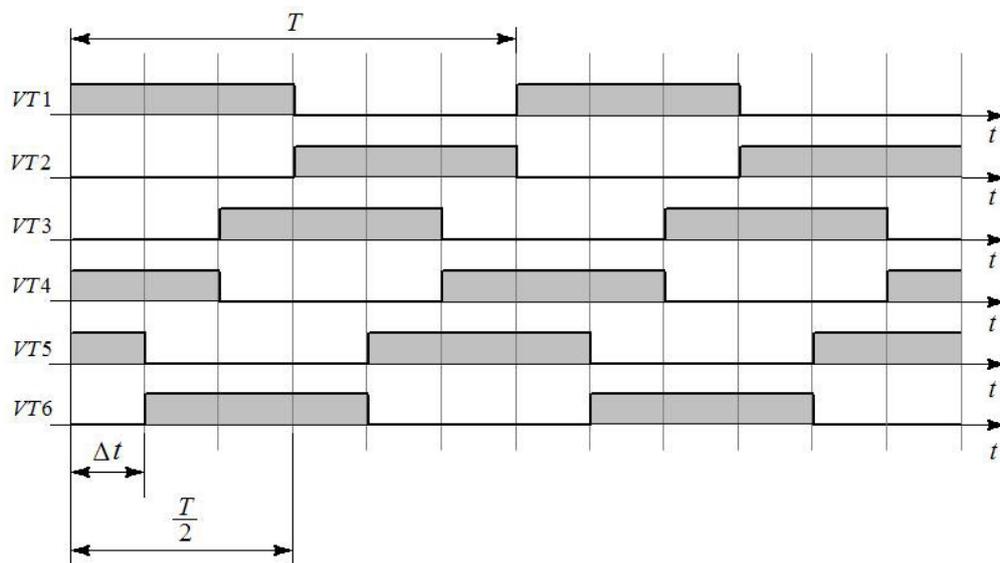


Рис. 5. Алгоритм переключения ключей инвертора

Тогда функции переключения ключей можно определить следующим образом:

$$R_{K1}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } F(t + 0\Delta t) \geq 0 \\ 0, & \text{при } F(t + 0\Delta t) < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$R_{K2}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } F(t + 3\Delta t) \geq 0 \\ 0, & \text{при } F(t + 3\Delta t) < 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$R_{K3}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } F(t + 2\Delta t) \geq 0 \\ 0, & \text{при } F(t + 2\Delta t) < 0 \end{cases} \quad (22)$$

$$R_{K4}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } F(t + 5\Delta t) \geq 0 \\ 0, & \text{при } F(t + 5\Delta t) < 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$R_{K5}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } F(t + 4\Delta t) \geq 0 \\ 0, & \text{при } F(t + 4\Delta t) < 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$R_{K6}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } F(t + \Delta t) \geq 0 \\ 0, & \text{при } F(t + \Delta t) < 0 \end{cases} \quad (25)$$

Таким образом, численное решение системы уравнений 3.14 при условиях 20 – 25 даст изменение токов в обмотках ДЭМД.

На основании принципа управления запишем выражения для угловой скорости (26) подвижного элемента ДЭМД.

$$\Omega = \frac{360}{T} \cdot f, \quad (26)$$

где  $p$  – число пар полюсов ротора ДЭМД;  $\frac{T}{\Delta t}$  – коэффициент дробления шага, показывает сколько раз за период изменяется состояние ключей инвертора;  $f$  – частота следования импульсов на выходе автономного инвертора.

Вследствие того, что для различных конструкций ДЭМД, имеющих разный диаметр ротора число пар полюсов различно, угловое перемещение, а следовательно и угловая скорость, также различны. Угловое перемещение на единицу величины шага тем больше, чем меньше диаметр ротора. Однако соотношение число пар полюсов/диаметр ротора для всех конструкций имеет одинаковое значение, т.е. линейное перемещение точки на поверхности ротора происходит постоянно. Таким образом, более целесообразно в математической модели использовать выражения для линейного перемещения, линейной скорости, и линейного ускорения, так как они являются унифицированными показателями для ДЭМД всех типоразмеров. На основании 26 запишем уравнение для линейного перемещения и скорости подвижной части ДЭМД:

$$l = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t}{p \cdot T} \cdot R_p, \quad (27)$$

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t}{p \cdot T} \cdot R_p \cdot f, \quad (28)$$

где  $R_p$  – радиус ротора ДЭМД.

С учетом уравнений 27, 28 перепишем уравнение 2, характеризующее процесс движения двухиндукторной системы на основе ДЭМД:

$$\begin{aligned} & (m_1 + m_2) \cdot \frac{d \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t}{p \cdot T} \cdot R_p \cdot f \right]}{dt} + k_{\text{ТР}} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t}{p \cdot T} \cdot R_p \cdot f + \\ & + \Delta m \cdot g \cdot e_{x,y,z} \cdot \text{sign} \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta t}{p \cdot T} \cdot R_p \cdot f \right) = \frac{1}{2} (I\omega)_\delta^2 \cdot \frac{dG}{d\xi}; \end{aligned} \quad (29)$$

Полученное уравнение 29 является обобщенным уравнением движения подвижных частей двухиндукторной системы, характеризующее взаимосвязь конструкторской концепции и концепции управления ДЭМД. Токи обмоток индукторов ДЭМД, а следовательно и намагничивающая сила  $I\omega$  определяются из математической модели электрической части ДЭМД: уравнений 14 – 18 и 20 – 25. Таким образом, для определения усилия, развиваемого электромагнитной системой ДЭМД (правой части уравнения 29), главной задачей является определение магнитной проницаемости  $G$  и скорости ее изменения в зависимости от взаимного смещения индуктор-ротор  $\frac{dG}{d\xi}$ . Для решения этой задачи необходимо создать математическую модель и методику расчета магнитной проницаемости зазора электромагнитной системы ДЭМД.

### Вопросы для самоконтроля знаний

1. Какие движения обеспечивает двухиндукторная (двухмассовая) система с ДЭМД?
2. Из каких элементов состоит кинематическая схема двухиндукторной (двухмассовой) системы?
3. По какой формуле определяется величина переменной составляющей силы?
4. Как выглядит электрическая принципиальная схема двухиндукторной системы?
5. Объясните алгоритм переключения ключей инвертора.

### 3.2. Разработка подсистемы автоматизации проектирования мультикоординатных электромехатронных систем движения

На сегодняшний день известно значительное количество универсальных систем автоматизированного проектирования (САПР), предназначенных для решения широкого круга задач. Вместе с тем, несмотря на широкий круг возможностей по автоматизации, универсальные системы, такие как, например *SolidWorks* часто недостаточно эффективны для решения конкретных задач, возникающих в процессе проектирования тех или иных устройств. Наличие в системе такого инструмента как интерфейс прикладного программирования (API от англ. *Application Programming Interface*) — набора стандартных программных прерываний, методов и форматов данных, используемых прикладной программой для запроса и получения от головной программы необходимых функций, ориентированного на создание пользовательских программных модулей на языках высокого уровня, интегрированных с базовым программным продуктом, позволяет расширять функциональность САПР для решения

узкоспециальных задач.

Для решения задач, связанных с проектированием многокоординатных манипуляторов на основе ДЭМД, по результатам проведенного сравнительного анализа представленных на рынке САПР среднего уровня, выбор был остановлен на системе *SolidWorks 2005*, как наиболее полно удовлетворяющей следующим критериям: распространенность САПР; стоимость САПР, её сопровождения и модификации; широта охвата задач проектирования; наличие интерфейса прикладного программирования; удобство работы САПР и её «дружественность»; наличие широкой библиотечной поддержки стандартных решений; возможность и простота стыковки с другими САПР.

САПР *SolidWorks* — система гибридного параметрического моделирования, которая предназначена для проектирования деталей и сборок в трехмерном пространстве с возможностью проведения различных видов анализа конструкций, а также оформления конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД и других стандартов.

С целью повышения степени автоматизации проектирования мультикоординатных электромехатронных систем движения (МЭСД) разработана подсистема САПР *SolidWorks* (ПСАПР), позволяющая:

- 1) значительно упростить и ускорить процесс проектирования МЭСД в соответствии с целевым критерием цена-качество;

- 2) автоматизировать процесс анализа непересекаемости элементов подвижных конструктивов в заданных диапазонах углового и линейного перемещения с целью повышения технико-эксплуатационных характеристик проектируемых МЭСД;

- 3) прогнозировать величину остаточной неуравновешенности масс подвижных конструктивов МЭСД, в соответствии с классом точности изготовления элементов конструкции.

Структурная схема предложенной подсистемы автоматизированного проектирования представлена на рис. 6. ПСАПР включает в себя: базу данных стандартных элементов конструкции, из которых происходит построение сборки в среде *SolidWorks*; модуль интерфейса, обеспечивающий ввод пользователем информации об исходных параметрах проектируемого манипулятора; модуль анализа непересекаемости элементов конструкции манипулятора в пределах рабочего диапазона перемещения подвижных конструктивов; модуль прогнозирования неуравновешенности масс подвижных конструктивов манипулятора для того или иного класса точности изготовления элементов конструкции.

В соответствии со структурной схемой (рис. 6) автоматизированное проектирование МЭСД при помощи предложенной ПСАПР включает в себя несколько этапов, подробно рассмотренных ниже.

Данный этап предполагает выбор структурной схемы проектируемого манипулятора, типоразмеров основных конструктивных элементов и предельных углов отклонения по каждой из координат. ПСАПР предназначена

для проектирования МЭСД по четырем различным структурным схемам, в соответствии с классификацией:

- 1) однокоординатного неуравновешенного  $\varphi$ -манипулятора;
- 2) однокоординатного уравновешенного  $\varphi$ -манипулятора;
- 3) двухкоординатного уравновешенного  $\varphi, \theta$ -манипулятора;
- 4) трехкоординатного уравновешенного  $\varphi, \theta, \psi$ -манипулятора.

Выбор структурной схемы проектируемой МЭСД, типоразмеров основных конструктивных элементов и предельных углов отклонения осуществляется при помощи элементов контроля, расположенных в левой части главного окна программы (рис. 7).

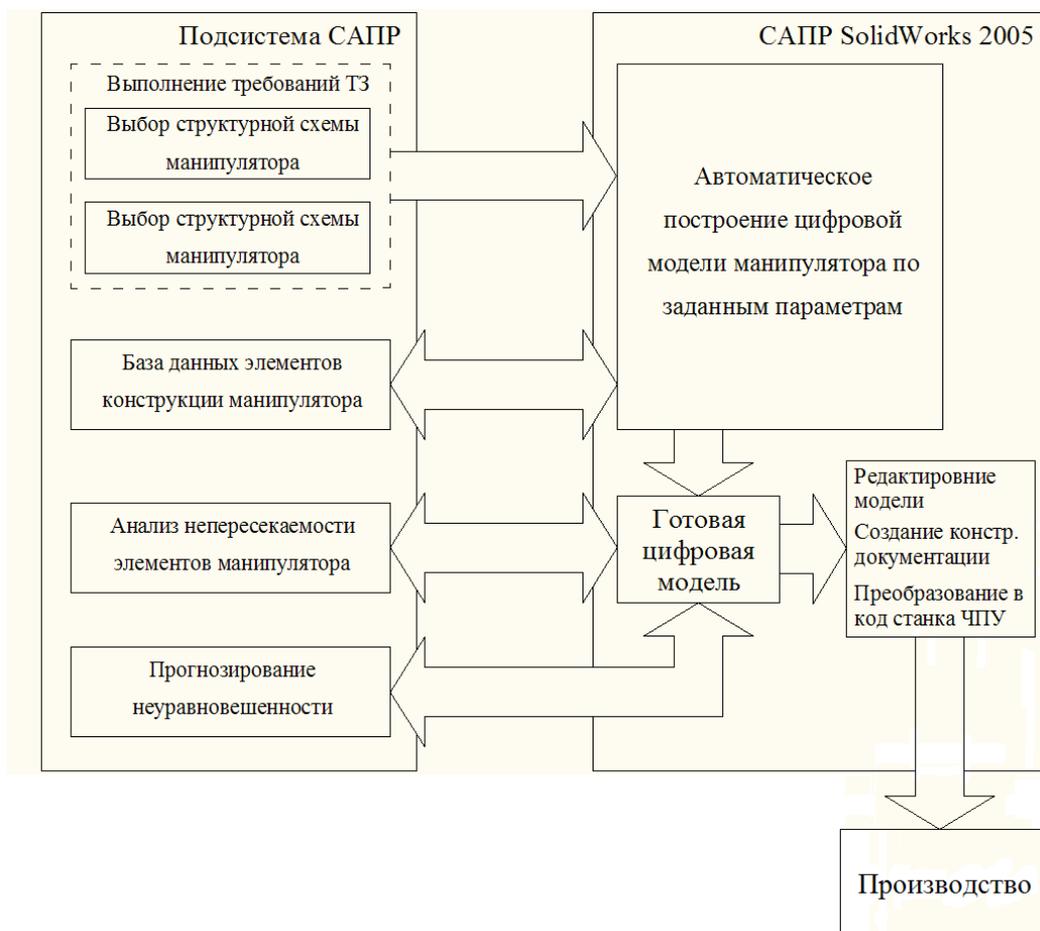


Рис. 6. Структурная схема автоматизированного проектирования МЭСД

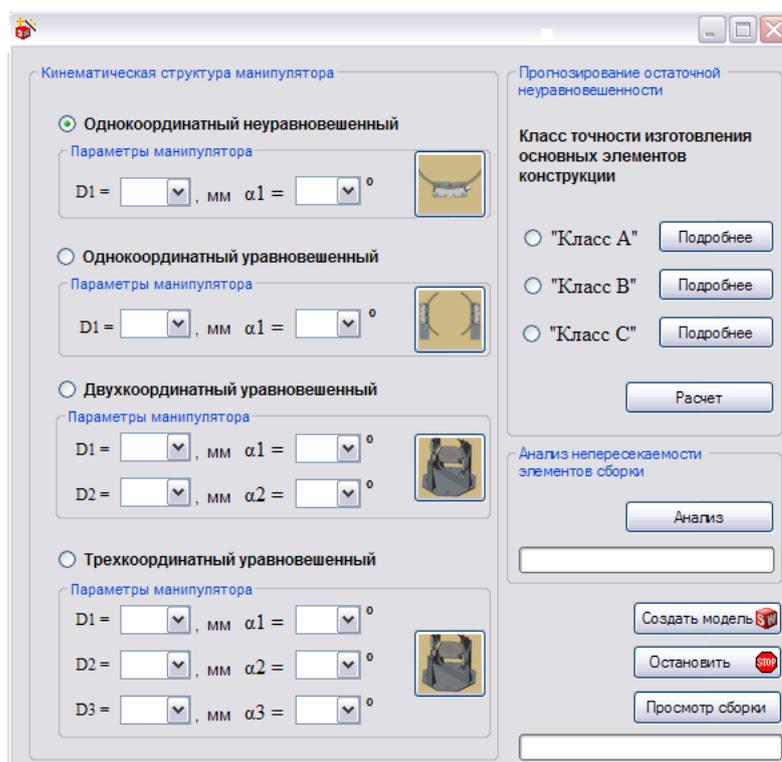


Рис. 7. Главное окно программы

### Вопросы для самоконтроля знаний

1. Для чего нужна подсистема автоматизации проектирования мультикоординатных электромехатронных систем движения?
2. Какая САПР была использована для создания подсистемы автоматизации проектирования мультикоординатных электромехатронных систем движения?
3. Изобразите структурную схему предложенной подсистемы автоматизированного проектирования.
  4. Какие структурные схемы используются в подсистеме?

### 3.3. Автоматизированное построение цифровой модели

После того, как все исходные параметры для проектирования были заданы, в соответствии с предложенной методикой пользователь производит нажатие кнопки «Создать модель» (рис. 7), расположенной в правом нижнем углу главного окна программы.

Для взаимодействия с САПР *SolidWorks 2005* программа использует набор *API*-функций, поставляемых в составе САПР. Список функций, использованных на этапе автоматизированного построения цифровой модели

манипулятора по заданным параметрам, и их краткое описание приведены в таблице 1.

Таблица 1

Перечень API-функций для автоматизированного построения цифровой модели манипулятора в САПР SolidWorks 2005

Функция	Краткое описание
SldWorks. <b>OpenDoc6</b> (FileName, Type, Options, Configuration, Errors, Warnings)	Открывает документ с заданным именем и параметрами в среде SolidWorks
SldWorks. <b>ActivateDoc2</b> (FileName, Silent, Errors)	Функция, активирующая ранее открытый документ с именем "FileName" для его редактирования
SldWorks.ModelDoc2. <b>Parameter</b> ("SketchName@ParameterName ").SystemValue	Функция, позволяющая получить значение параметра "ParameterName" эскиза "SketchName" активного документа с целью его изменения либо дальнейшего использования
SldWorks.ModelDoc. <b>EditRebuild3</b> ()	Перестраивает элемент в соответствии с выполненными изменениями
SldWorks.ModelDoc. <b>ClearSelection2</b> ()	Снимает выделение с ранее выделенного объекта
SldWorks.FeatureManagerClass. <b>FeatureCircularPattern2</b> (Num, Spacing, FlipDir, DName, GeometryPattern)	Функция создания кругового массива с заданным количеством элементов "Num" через заданный угол, определяемый параметром "Spacing"
SldWorks.ModelDocExtension. <b>SelectByID2</b> (Name, Type, X, Y, Z, Append, Mark, Callout, SelectOption)	Производит выделение объекта типа "Type" с именем "Name" по заданному имени либо координатам X, Y, Z.
SldWorks. <b>NewDocument</b> (TemplateName, PaperSize, Width, Height)	Функция создания нового документа с заданным именем "Name"
SldWorks.AssemblyDoc. <b>AddComponent</b> (CompName, X, Y, Z)	Добавляет компонент с именем "CompName" в сборку
SldWorks. <b>CloseDoc</b> ()	Закрывает активный документ
SldWorks.AssemblyDocClass. <b>Add</b>	Функция установления сопряжения

Функция	Краткое описание
<b>Mate2</b> (MateType, Align, Flip, Distance, Distance-AbsUpperLimit, DistanceAbsLowerLimit, GearRatioNumerator, GearRatioDenominator, Angle, AngleAbsUpperLimit, AngleAbsLowerLimit, Error-Status)	типа "MateType" между несколькими ранее выделенными объектами с различными параметрами
SldWorks. <b>CloseDoc</b> ("NameDoc")	Закрывает документ с именем "NameDoc"
SldWorks. <b>Visible</b> ()	При помощи данной функции приложение может быть переведено в активный, либо в фоновый режим
SldWorks.ModelDoc2. <b>EditDelete</b> ()	Функция, используемая для удаления ранее выделенного объекта или сопряжения
SldWorks.AssemblyDocClass. <b>Edit Mate2</b> (MateType, Align, Flip, Distance, Distance-AbsUpperLimit, DistanceAbsLowerLimit, GearRatioNumerator, GearRatioDenominator, Angle, AngleAbsUpperLimit, AngleAbsLowerLimit, Error-Status)	Функция редактирования ранее созданного сопряжения типа "MateType" между несколькими ранее выделенными объектами с различными параметрами
SldWorks.ISelectionMgr. <b>GetSelectedObjectCount</b> ()	Возвращает количество выделенных объектов
SldWorks.ISelectionMgr. <b>GetSelectedObjectsComponent2</b> (Number)	Возвращает элемент под номером "Number" в списке выделенных компонентов
SldWorks.AssemblyDocClass. <b>ToolsCheckInterference2</b> (NumComponents, LpComponents, Coincident-Interference, PComp, PFace)	Проверка пересекания двух и более компонентов, из массива LpComponents. В результате выполнения данной функции массивы PComp и PFace содержат список компонентов и плоскостей, между которыми обнару-

Функция	Краткое описание
	жены пересечения
SldWorks.IMassProperty.CenterOfMass()	Возвращает координаты центра масс
SldWorks.IMassProperty.Mass()	Возвращает массу выделенных элементов

После того, как была нажата клавиша "Создать модель" при помощи функции *OpenDoc6* (см. табл. 1) в среде *SolidWorks 2005* последовательно открываются файлы деталей, хранящихся в БД, необходимые для построения сборки манипулятора со структурой, выбранной на этапе 1.

БД стандартных элементов представляет собой упорядоченный набор базовых деталей с одним или несколькими независимыми и одним или несколькими зависимыми параметрами. Иными словами в элементе созданы такие взаимосвязи, которые обеспечивают автоматическое изменение всех необходимых размеров детали в соответствии с исходными размерами, заданными пользователем на этапе 1. Это позволяет значительно сократить количество элементов, хранимых в БД за счет исключения однотипных. На рис. 8 показаны взаимосвязи основного эскиза для одного из элементов БД. На данном рисунке знаком "\*" отмечен исходный размер, значение которого задается пользователем на этапе 1. Размеры со знаком "Σ" являются зависимыми, т.е. изменяют свое значение в соответствии с заданной зависимостью относительно исходного размера, остальные размеры эскиза имеют постоянное значение.

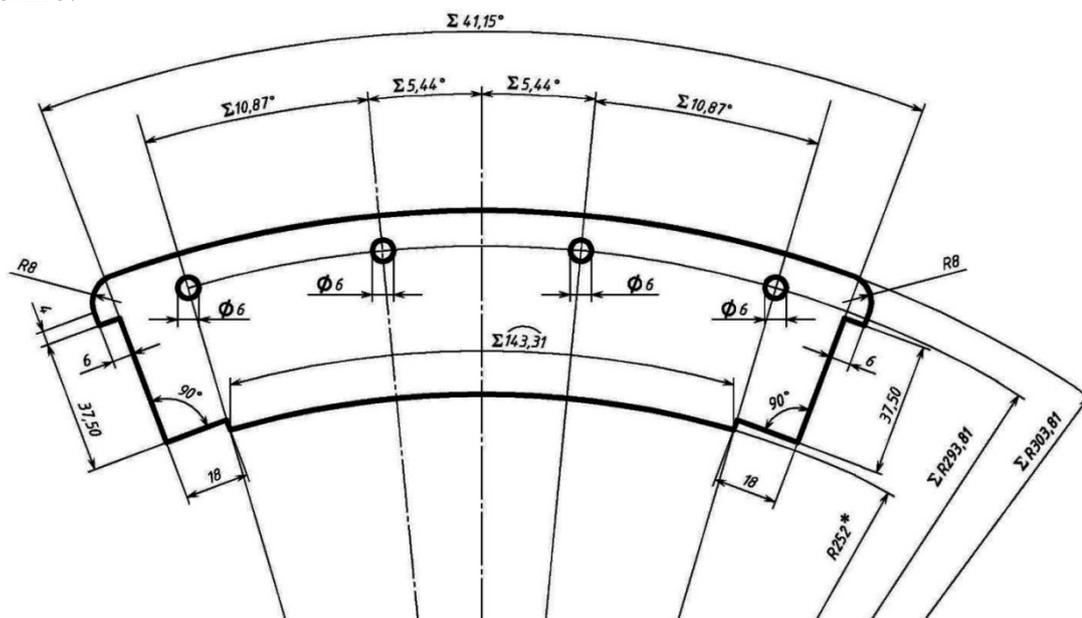


Рис. 8. Взаимосвязь размеров основного эскиза одного из стандартных элементов БД

Так как элементы конструкции, хранящиеся в БД являются универсальными для всех типоразмеров манипуляторов, их перестройка в соответствии с заданными параметрами происходит на этапе 2. Рассмотрим процедуру, выполняющую построение одного из элементов конструкции — индуктора ДЭМД, основной эскиз которого представлен на рис. 3.8. Для редактирования детали необходимо сделать соответствующий документ активным в среде *SolidWorks* при помощи функции *ActivateDoc2*.

```
part = swApp.ActivateDoc2("Индуктор.SLDPRT", False, longstatus)
```

Для того чтобы иметь возможность использовать функции классов *ActiveDoc* и *Extension* создаем экземпляры этих классов.

```
swModel = swApp.ActiveDoc
```

```
swModelExt = swModel.Extension
```

```
boolstatus = swModel.SetUserPreferenceToggle(198, True)
```

Далее переходим непосредственно к построению индуктора. Параметру *D2* эскиза 1 присваиваем значение переменной *DelitDiam*, в которой хранится значение делительного диаметра ДЭМД, введенного пользователем на этапе выполнения требований технического задания. После этого, перестраиваем модель с помощью функции *EditRebuild3* для того чтобы произведенные изменения вступили в силу.

```
swModel.Parameter("D2@Эскиз1").SystemValue = DelitDiam
```

```
boolstatus = swModel.EditRebuild3
```

При этом, т.к. элемент БД имеет внутренние взаимосвязи все остальные размеры элемента изменятся в соответствии со значением *DelitDiam*. Для обеспечения построения деталей, размеры которых зависят от размеров индуктора и дальнейшей их взаимной привязке в сборке необходимо получить значения некоторых базовых размеров индуктора. Переменной *b* присвоено значение *D26* эскиза 1, что соответствует диаметру, на котором расположены крепежные отверстия.

```
b = swModel.Parameter("D26@Эскиз1").SystemValue
```

Переменной *c* присвоено значение *D23* эскиза 1 — значение угла между крепежными отверстиями, переменной *d* присвоено значение *D27* эскиза 1 — угол между образующими плоскостями индуктора. Полученные значения и в том и в другом случае из радианной меры угла переведены в градусную.

```
c = swModel.Parameter("D23@Эскиз1").SystemValue
```

```
cgrad = (c * 180) / pi
```

```
d = swModel.Parameter("D27@Эскиз1").SystemValue
```

```
dgrad = (d * 180) / 3.1415
```

Аналогичным образом переменным *f*, *g* и *VneshDiamInd* присваиваются значения толщины, длины дуги окружности и внешнего диаметра индуктора, после чего выполняется функция *ClearSelection2*, снимающая выделение со всех ранее выделенных объектов.

```
f = swModel.Parameter("D29@Эскиз1").SystemValue
```

```

g = swModel.Parameter("D30@Эскиз1").SystemValue
VneshDiamInd = swModel.Parameter("D31@Эскиз1").SystemValue
swModel.ClearSelection2(True)

```

Таким образом, в результате выполнения рассмотренной выше процедуры один из стандартных элементов был перестроен в соответствии с параметрами, заданными пользователем, получены размеры, необходимые для построения деталей, параметры которых являются зависимыми от параметров данного элемента. Далее происходит запуск процедуры, обеспечивающей перестройку следующей необходимой детали и т.д. до тех пор, пока все элементы, имеющие зависимые размеры, не будут перестроены в соответствии с заданными размерами, после чего выполняется следующий участок программного кода:

```

part = swApp.NewDocument("C:\..\Сборка_ESKD.asmdot", 0, 0.0#, 0.0#)
part = swApp.ActivateDoc2("Сборка_ESKD.asmdot", False, longstatus).

```

В результате его выполнения происходит создание нового файла сборки в среде *SolidWorks* и перевод его в активный режим. Для добавления деталей в сборку используется функция *AddComponent*. После того, как все необходимые детали будут добавлены в сборку, происходит вызов функции *CloseDoc* для закрытия каждого из файлов деталей.

Построение цифровой модели выполняется отдельным программным модулем, который является универсальным и используется в построении манипуляторов всех четырех типов, при этом при его вызове происходит передача ряда параметров, характерных для того или иного типа манипулятора. В результате работы модуля устанавливается большая часть сопряжений сборки манипулятора. Некоторые специфичные сопряжения устанавливаются далее в тексте основной программы. Ниже приведен пример программного кода, выполняющий сопряжение фронтальной плоскости индуктора ДЭМД с фронтальной плоскостью кронштейна крепления.

```

boolstatus = swModelExt.SelectByID2("Плоскость1@Индуктор-" &K&
"@Сборка1", "PLANE", 0, 0, 0, True, 1, Nothing, 0)
boolstatus = swModelExt.SelectByID2("Плоскость2@Кронштейн-" &K&
"@Сборка1", "PLANE", 0, 0, 0, True, 1, Nothing, 0)
Feature = swAssembly.AddMate2(0, 1, False, 0, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, longstatus)
swModel.ClearSelection2(True)

```

После того, как все сопряжения в сборке установлены посредством вызова функции *Visible(True)* приложение *SolidWorks 2005* переводится из фонового режима в активный для того чтобы пользователь имел возможность редактирования полученной сборки средствами *SolidWorks 2005*. На рис. 9 показан общий вид цифровой модели однокоординатного манипулятора уравновешенного типа, созданной при помощи разработанной ПСАПР.

Полученная цифровая модель манипулятора содержит все необходимые сопряжения, включающие сопряжения-ограничения, позволяющие

наглядно оценивать перемещения рабочего органа манипулятора в заданных пределах; позволяет проводить редактирование, как отдельных элементов, так и всей сборки в целом; оценивать и минимизировать массовые характеристики проектируемого манипулятора, создавать конструкторскую документацию.

### Вопросы для самоконтроля знаний

1. Что называют цифровой моделью?
2. Назовите элементы из перечня API-функций.
3. Объясните взаимосвязь размеров основного эскиза одного из стандартных элементов БД?
4. Что содержит цифровая модель манипулятора?

### 3.4. Анализ непересекаемости подвижных конструктивов

Предложенная ПСАПР содержит модуль, обеспечивающий анализ полученной цифровой модели манипулятора на непересекаемость элементов подвижных конструктивов в процессе движения в заданном диапазоне перемещения.

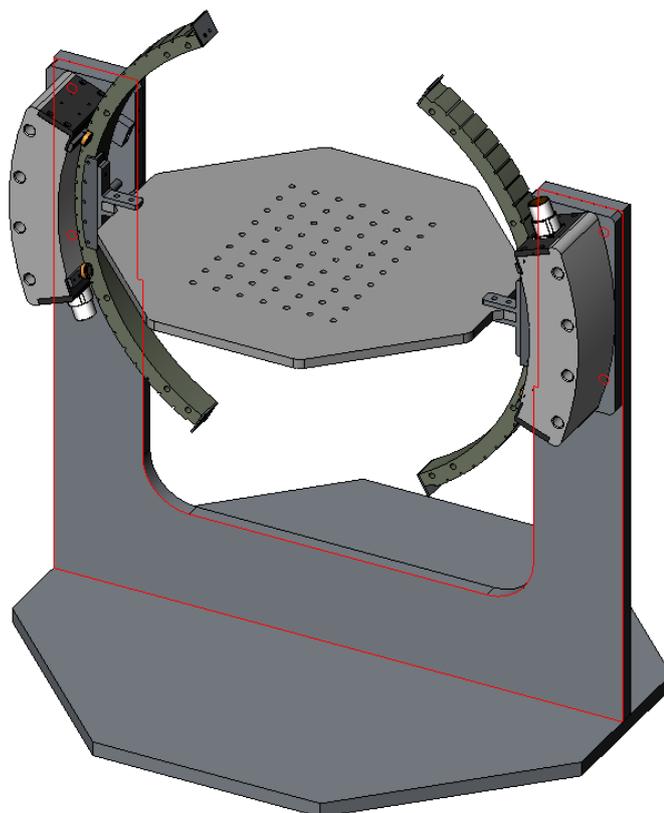


Рис. 9. Общий вид цифровой модели однокоординатного манипулятора уравновешенного типа.

Для того чтобы выполнить анализ конструкции манипулятора на непесекаемость после того, как сборка цифровой модели полностью завершена пользователь нажимает кнопку "Анализ" в правой части главного окна программы (рис. 7). Перечень API-функций, используемых при анализе непесекаемости, приведен в табл. 5.

Рассмотрим участок программного кода, обеспечивающий анализ цифровой модели однокоординатного манипулятора с уравновешенной структурой (рис. 9) на непесекаемость элементов конструкции.

Переменная *MaxDeg* принимает значение максимального угла отклонения рабочего стола манипулятора, заданного пользователем на первом этапе. Таким образом, следующие строки кода означают, что в ходе выполнения цикла рабочий стол переместится на угол от  $-MaxDeg$  до  $+MaxDeg$  с шагом  $1^\circ$ . ( $1^\circ = 0.0174532925199$  рад)

```
For j = 0 To MaxDeg*2  
k = k + 0.0174532925199
```

Выделяем ранее созданное сопряжение между плоскостью 3 основания и плоскостью 2 рабочего стола манипулятора. Именно это сопряжение определяет угол отклонения рабочего стола. Переменная *S* типа *boolean* используется для отслеживания ошибок при выделении. Если выделение прошло успешно переменная *S* принимает значение *true*, в противном случае — *false*.

```
S = swModelExt.SelectByID2("Угол6", "MATE", 0, 0, 0, False, 0,  
Nothing, 0)  
S = swModelExt.SelectByID2("Плоскость3@Основание-1@Сборка1",  
"PLANE", 0, 0, 0, True, 1, Nothing, 0)  
S = swModelExt.SelectByID2("Плоскость2@Стол-1@Сборка1",  
"PLANE", 0, 0, 0, True, 1, Nothing, 0)
```

Переходим к редактированию выделенного сопряжения, после чего перестраиваем модель чтобы изменения вступили в силу. В результате редактирования угол между плоскостью 3 основания и плоскостью 2 рабочего стола манипулятора станет равным *k*.

```
swAssembly.EditMate2(6, 1, False, 0, 0, 0, 1, 1, k, k, k, longstatus)  
S = swModel.EditRebuild3  
swModel.ClearSelection2(True)
```

В результате выполнения нижеприведенного участка программного кода происходит выделение тех компонентов цифровой модели манипулятора между которыми может возникнуть пересечение, при этом *swSelData* содержит список выделенных объектов, *nSelCount* — количество выделенных объектов. В качестве примера приведен анализ на непесекаемость двух компонентов сборки.

```
S = swModelExt.SelectByID2("Стол-1@Сборка1", "COMPONENT",  
0, 0, 0, False, 0, Nothing, 0)
```

```
S = swModelExt.SelectByID2("Кронштейн-1@Сборка1",  
"COMPONENT", 0, 0, 0, True, 0, Nothing, 0)
```

```
swSelMgr = swModel.SelectionManager
```

```
swSelData = swSelMgr.CreateSelectData
```

```
nSelCount = swSelMgr.GetSelectedObjectCount
```

После того, как все необходимые компоненты выделены в следующем цикле создается и заполняется массив компонентов *CompArray*.

```
ReDim CompArray(nSelCount - 1)
```

```
For i = 0 To (nSelCount - 1)
```

```
CompArray(i) = swSelMgr.GetSelectedObjectsComponent2(i + 1)
```

```
Next i
```

```
vCompArray = CompArray
```

На данном этапе можно непосредственно приступить к проверке компонентов массива *vCompArray* на пересекаемость. В случае если обнаружено пересечение выдается соответствующее сообщение, в котором указывается при отклонении на какое количество градусов произошло пересечение. В случае, если пересечений при данном угле отклонения рабочего стола не обнаружено, то цикл повторяется заново со значением угла отклонения рабочего стола увеличенным на один градус. Если во всем диапазоне отклонений рабочего стола от  $-MaxDeg$  до  $+MaxDeg$  пересечений обнаружено не будет выдается сообщение "Пересечений компонентов не обнаружено."

```
swAssembly.ToolsCheckInterference2(nSelCount, (vCompArray),
```

```
bCoincidentInterference, vIntCompArray, vIntFaceArray)
```

```
If (vIntCompArray Is Nothing) And (vIntFaceArray Is Nothing) Then
```

```
swModel.ClearSelection2(True)
```

```
Else
```

```
If Not vIntCompArray Is Nothing Then
```

*MsgBox*("Компоненты сборки пересекаются при отклонении рабочего стола на " & j & " и более градусов", *MsgBoxStyle.Inf*)

```
swModel.ClearSelection2(True)
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
End If
```

```
Next j
```

*MsgBox*("Пересечений компонентов не обнаружено", *MsgBoxStyle.Inf*)

Таким образом, предложенный модуль обеспечивает анализ цифровой модели манипулятора на непересекаемость элементов подвижных конструктивов в процессе движения в заданном диапазоне их взаимного перемещения.

### 3.5. Прогнозирование неуравновешенности масс подвижных конструктивов

При проектировании МЭСД на основе ЭППД важнейшее значение принимает задача уравнивания сил, действующих на подвижные части конструкции. Неуравновешенность обусловлена тем, что практически центр тяжести системы всегда смещен относительно осей электромеханизма. Величина смещения, как и обусловленный им момент дисбаланса трудно поддается расчету.

На подвижный элемент неуравновешенного ДЭМД при перемещении некоторой массы действует сила скатывания. Эта сила определяет нелинейный характер нагрузки ДЭМД. В результате значительная часть полезного усилия, развиваемого ДЭМД, идет на преодоление силы скатывания. Кроме того, в неуравновешенном ДЭМД невозможно обеспечить «безмоментную» фиксацию подвижного органа в заданном положении. В традиционном электроприводе такая фиксация обеспечивается применением фиксаторов и необратимых передач, что ведет к дополнительным потерям энергии, снижению к.п.д. и быстродействия.

Такие способы фиксации конструктивно непригодны для ДЭМД. Следовательно, в целях повышения к.п.д. за счет компенсации силы скатывания, значительного повышения точности отработки управляющих сигналов, обеспечения «безмоментной» фиксации подвижной части необходимо уравновесить подвижные массы ДЭМД.

На рис. 10 приведена кинематическая схема уравновешенного однокоординатного манипулятора на основе пары ДЭМД, обеспечивающего поворотное перемещение рабочего стола относительно оси  $Y$  на угол  $\alpha$ .

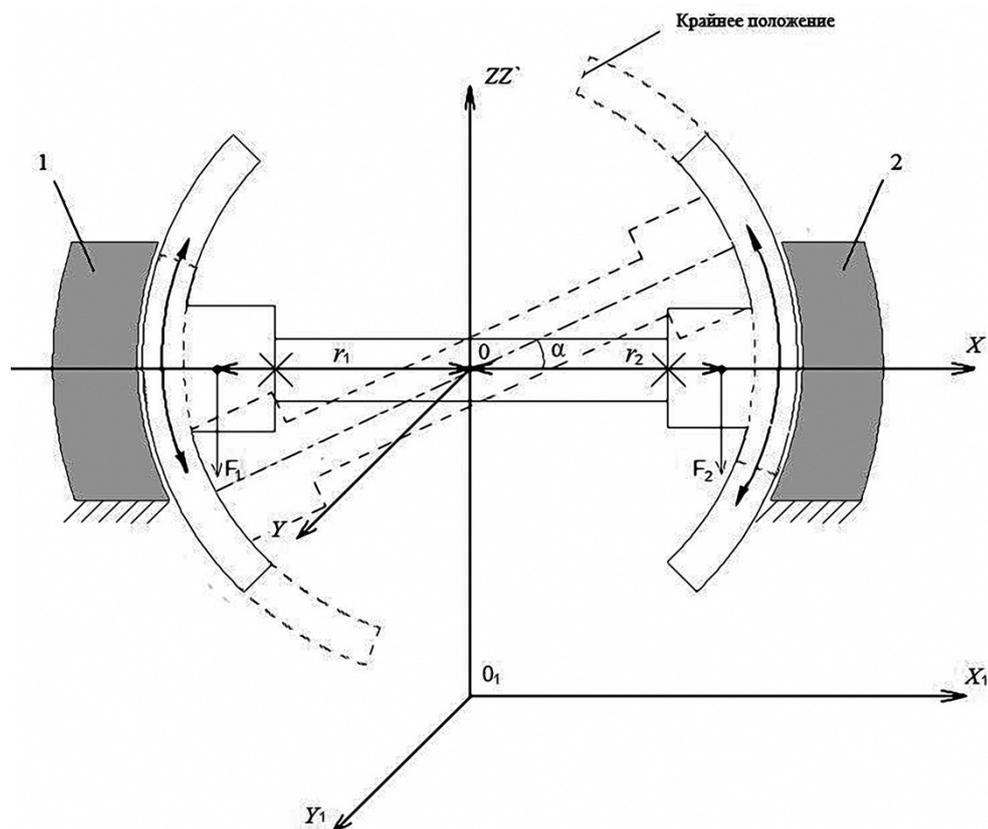


Рис. 10. Кинематическая схема уравновешенного однокоординатного электропривода на основе ДЭМД

Кинематическая пара, обеспечивающая перемещение рабочего стола относительно оси  $X$  является идентичной.

Движение дугового ротора с закрепленной на нем перемещаемой массой происходит относительно неподвижных индукторов 1 и 2, жестко закрепленных на неподвижном основании. Представленная кинематическая схема соответствует концепции симметричности технологической среды и является принципиально уравновешенной по своей структуре. В качестве массы-противовеса выступает идентичный первому дуговой ротор с закрепленной на нем массой, центр тяжести которой расположен симметрично относительно оси дуги.

Рассматриваемый дуговой электропривод будет уравновешен при следующем условии:

$$\sum M_{ix} = 0, e_{iyz} = 0 \quad (30)$$

где  $M_{ix}$  – моменты сил, действующие на подвижные элементы ДЭМД относительно оси  $X$ ;  $e_{iyz}$  – эксцентриситет между центрами масс подвижных элементов и осями  $Y, Z$ .

Действительно, как видно из рис. 10 при равноудаленности центров

масс подвижных элементов от центра координат векторы сил  $F_1$  и  $F_2$ , определяющие момент силы скатывания будут равны по величине и направлены встречно, следовательно, суммарная сила скатывания в уравновешенном электроприводе:

$$F_{ск} = 0 \quad (31)$$

На практике условие (31) выполняется с определенной погрешностью. Допустимая неуравновешенность определяется:

$$\Delta m = m_{пч1} - m_{пч2}, \quad (32)$$

где  $m_{пч1}$  – масса подвижной части первого ДЭМД;  $m_{пч2}$  – масса подвижной части второго (уравновешивающего) ДЭМД;

Условие уравновешенности однокоординатного электропривода с учетом возможной рассогласованности электромагнитных систем двух ДЭМД будет выполняться при минимуме целевой функции [87]:

$$F_{ур.эм.} = f(\Delta m, \Delta r, \Delta z, \Delta \varphi | F_{ЭМ1\perp} - F_{ЭМ2\perp}) \rightarrow \min, \quad (33)$$

где  $\Delta m$  – неуравновешенность масс подвижных частей ДЭМД;  $\Delta r = |r_1 - r_2|$  – разность расстояний от центра вращения до центров масс подвижных частей ДЭМД1 и ДЭМД2 соответственно;  $\Delta z$  – расстояние от центра масс подвижной части электропривода до центра вращения по оси  $Z$ ;  $\Delta \varphi$  – разность фаз магнитных проводимостей воздушного зазора ДЭМД1 и ДЭМД2;  $F_{ЭМ1\perp}$  – перпендикулярная составляющая силы электромагнитного взаимодействия системы «статор-ротор» ДЭМД1;  $F_{ЭМ2\perp}$  – перпендикулярная составляющая силы электромагнитного взаимодействия системы «статор-ротор» ДЭМД2.

Несбалансированность электромагнитных систем ДЭМД может быть устранена при помощи предложенной в данном диссертационном исследовании методики выставки сегментных индукторов относительно дуговых магнитопроводов двухиндукторной системы с ДЭМД.

Величина момента дисбаланса  $\sum M_{ix}$  носит случайный характер и различна для каждого конкретного манипулятора даже при их серийном производстве вследствие технологического разброса, поэтому не может быть точно оценена на этапе проектирования.

Предложено при помощи разработанной ПСАПР на основании анализа цифровой модели манипулятора прогнозировать максимальную величину момента дисбаланса, обусловленного неуравновешенностью масс подвижных конструктивов манипулятора, для того или иного класса точности изготовления элементов конструкции.

В правой части главного окна программы (рис.7) расположена панель «Прогнозирование остаточной неуравновешенности» на которой представлен ряд переключателей, при помощи которых пользователем производится выбор класса точности изготовления основных элементов конструкции проектируемого манипулятора.

Прогнозирование величины остаточной неуравновешенности основано на следующем принципе: в цифровой модели манипулятора оси вращения электромеханизмов пересекаются в точке, совпадающей с центром масс подвижных элементов конструкции, поэтому момент дисбаланса отсутствует  $\sum M_{ix} = 0$ . При реальном производстве неизбежные погрешности в изготовлении деталей и их взаимной установке ведут к смещению центра вращения относительно центра масс. Для того, чтобы учесть влияние этих погрешностей на величину неуравновешенности в конструкции выделено несколько основных узлов, неточность в изготовлении которых наибольшим образом влияет на смещение центра вращения (рис. 11). Условно введено три обобщенных класса точности «Класс А», «Класс В» и «Класс С». Соответствующие этим классам максимальные допуски для отдельных элементов конструкции представлены в таблице 2. Таким образом, задача определения максимально возможной неуравновешенности сводится к определению расогласованности центра вращения и центра масс подвижных элементов конструкции. Алгоритм решения данной задачи в предложенной ПСАПР реализован следующим образом.

В качестве исходных данных для анализа предположим, что имеется открытый в среде *SolidWorks* 2005 файл цифровой модели однокоординатного (или двухкоординатного) манипулятора уравновешенной структуры, созданной ранее при помощи ПСАПР. При этом в памяти хранится набор предельно допустимых отклонений (табл. 2) для каждой детали, расположенной в ранее определенных «критических» узлах (рис. 11).

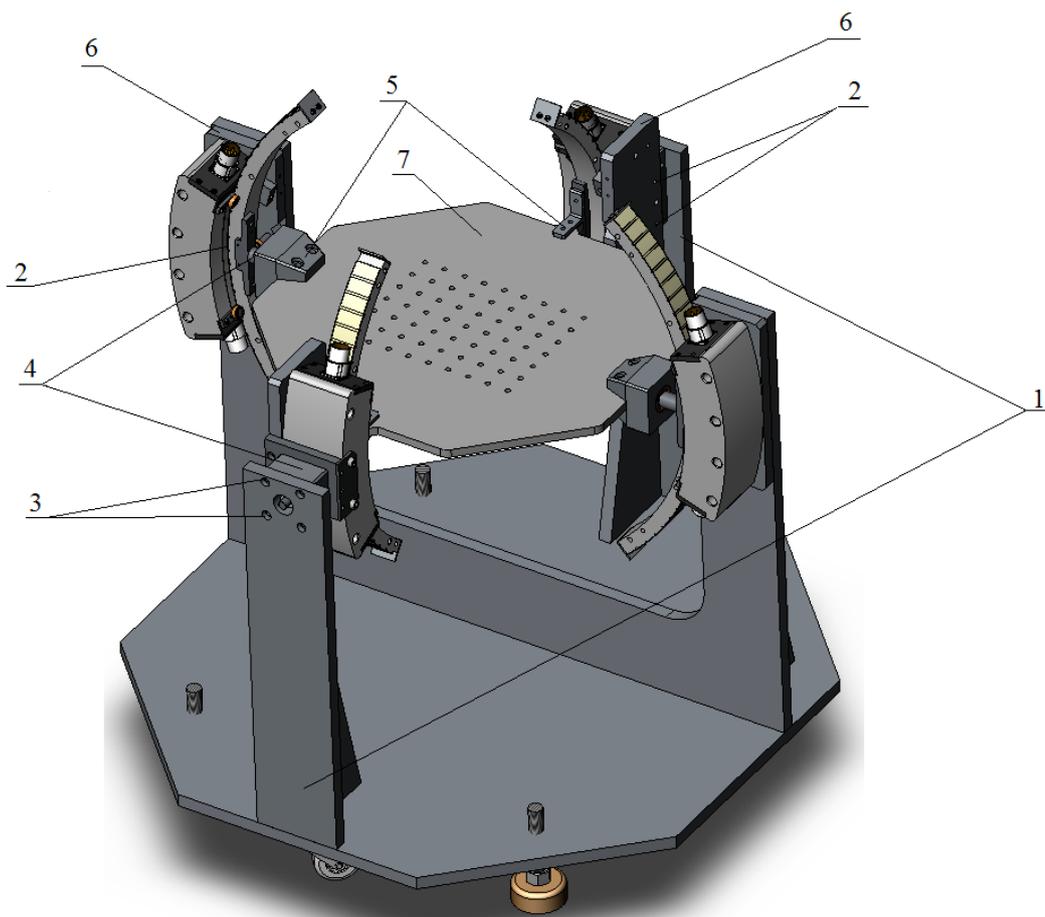


Рис. 11. Основные узлы в конструкции двухкоординатного манипулятора, погрешности в которых оказывают наибольшее влияние на величину неуравновешенности

После того, как пользователь выбрал предполагаемый класс точности при помощи переключателей в правой части главного окна программы он производит нажатие кнопки «Рассчитать».

При этом прежде всего доопределяются следующие переменные и объекты:

*Dim swMass As SldWorks.MassProperty*

*Dim MassCenter As Object*

*Dim Mass, Xcoor1, Ycoor1, Zcoor1, Xcoor2, Ycoor2, Zcoor2 As Double*

При помощи последовательного вызова функции *SelectByID2*, подробно рассмотренной выше производится выделение всех подвижных компонентов сборки.

*S = swModelExt.SelectByID2("Имя компонента@Имя сборки", "COMPONENT", 0, 0, 0, True, 0, Nothing, 0)*

После того, как все необходимые компоненты модели выделены

Таблица 2

Предельно допустимые величины отклонений размеров  
для различных классов точности изготовления элементов МЭСД

Наименование отклонения	Величина предельного отклонения от номинального значения		
	Класс А	Класс В	Класс С
Несимметричность установки несущих кронштейнов 1 (рис. 2.33)	$\pm 0,01\%$	$\pm 0,1\%$	$\pm 0,5\%$
Разброс величины воздушного зазора статор-ротор 2	$\pm 0,01$ мм	$\pm 0,1$ мм	$\pm 0,3$ мм
Неточность расположения крепежных отверстий 3 кронштейнов 1, 6	$\pm 0,01$ мм	$\pm 0,1$ мм	$\pm 0,5$ мм
Несоосность установки подшипниковых узлов 4	$\pm 0,03$ мм	$\pm 0,3$ мм	$\pm 1$ мм
Неточность расположения отверстий 5 крепежных элементов	$\pm 0,01$ мм	$\pm 0,1$ мм	$\pm 0,5$ мм
Неточность расположения крепежных отверстий рабочего стола 7	$\pm 0,03$ мм	$\pm 0,3$ мм	$\pm 1$ мм

выполняется следующий участок программного кода:

```
MassCenter = swMass.CenterOfMass
```

```
Xcoor1 = MassCenter(0)
```

```
Ycoor1 = MassCenter(1)
```

```
Zcoor1 = MassCenter(2)
```

в результате чего переменным *Xcoor1*, *Ycoor1* и *Zcoor1* присваиваются значения координат центра масс подвижных конструктивов манипулятора, который в данный момент совпадает с центром вращения, т.к. цифровая модель выполнена на данном этапе без учета допусков и является идеально уравновешенной.

После того, как координаты точки пересечения осей вращения электромеханизмов были получены, при помощи функций, рассмотренных ранее, производится редактирование элементов, составляющих сборку, для которых определены предельные отклонения. При этом перестроение деталей ведется таким образом, чтобы добиться максимальной неуравновешенности, обусловленной суммарным действием предельно допустимых отклонений размеров деталей в соответствии с выбранным ранее классом точности.

После того, как все необходимые перестроения будут завершены цифровая модель манипулятора перестраивается при помощи функции *swModel.EditRebuild3*.

Для определения полученной асимметричности модели производится выделение всех подвижных компонентов сборки при помощи последовательного вызова функции *SelectByID2*.

После того, как все необходимые компоненты модели были выделены производится вызов функции *CenterOfMass*, для определения координат центра масс подвижных элементов после проведенных преобразований, а также функции *MassProperty.Mass* возвращающей значение массы выделенных элементов.

*SwMass = swModelExt.CreateMassProperty*

*Mass = swMass.Mass*

*MassCenter = swMass.CenterOfMass*

*Xcoor2 = MassCenter(0)*

*Ycoor2 = MassCenter(1)*

*Zcoor2 = MassCenter(2)*

Таким образом, зная координаты центра масс подвижных элементов до и после преобразования можем определить момент дисбаланса в соответствии со следующим выражением:

$$M_{x,y} = e_{x,y} \cdot m_{п.ч} \cdot g \cdot \cos(\alpha)$$

где  $e_{x,y}$  – расстояние между центром вращения и центром масс по осям  $X$  и  $Y$ ,  $m_{п.ч.}$  – суммарная масса подвижных элементов,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\alpha$  – угол отклонения рабочего стола от горизонтального положения.

По результатам проведенного анализа для двухкоординатного манипулятора получены значения момента дисбаланса для трех классов точности изготовления элементов конструкции. Полученные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3

Максимальный момент дисбаланса конструкции  
для различных классов точности

Класс точности	Максимальный момент дисбаланса, Нм	
	Координата $X$	Координата $Y$
Класс $A$	3,08	0,858
Класс $B$	0,89	0,275
Класс $C$	0,063	0,017

Предложенная методика и подсистема автоматизированного проектирования использована в процессе исследований функционирования ММ в рамках лабораторных работ и в ходе выполнения студентами проектов ГПО, что способствует приобретению ими практических навыков автоматизированного проектирования устройств многокоординатной электромехатроники.

Методика автоматизированного проектирования ММ отличается оригинальностью подхода, позволяет получить синергетический эффект, заключающийся в рациональности схемно-конструкторской компоновки манипулятора, минимизации массогабаритных характеристик ММ и уменьшении неуравновешенности подвижных частей.

### **Вопросы для самоконтроля знаний**

1. Что такое неуравновешенность масс подвижных конструктивов?
2. Какая сила действует на подвижный элемент неуравновешенного ДЭМД при перемещении некоторой массы?
3. Какие способы фиксации конструктивно непригодны для ДЭМД?
4. Изобразите с помощью кинематической схемы уравновешенный однокоординатный электропривод на основе ДЭМД.
5. Запишите условие уравновешивания дугового электропривода.

### **3.6. Выставка сегментных индукторов относительно дуговых магнитопроводов двухиндукторной системы**

Технико-эксплуатационные показатели функционирования двухиндукторной системы на основе ДЭМД в значительной мере зависят от качества согласования электромагнитной системы сегментных индукторных электродвигателей. Рассогласованность электромагнитной системы приводит, прежде всего, к снижению полезного момента, К.П.Д. и точности позиционирования.

Таким образом, для того, чтобы избежать снижения силовой характеристики ДС вследствие несогласованности электромагнитной системы в процессе ее сборки необходимо обеспечивать взаимное согласование подвижных друг относительно друга индукторов с электромагнитной системой ротора. Известные способы и методики согласования электромагнитных систем в процессе сборки обладают рядом существенных недостатков. К таким недостаткам, прежде всего можно отнести необходимость использования высокоточных оправок, кондукторов и метрологического оборудования. Вследствие этого применение известных методик не всегда является технически выполнимым и экономически оправданным, особенно в случае мелкосерийного производства.

Известен способ по патенту РФ №2353044, позволяющий производить согласование зубцовых и полюсных зон электромагнитных устройств и

устройств с постоянными магнитами без использования вышеперечисленного высокоточного оборудования. Технологический процесс осуществляют с использованием штатного корпуса операционного автомата во время сборки следующим образом.

На рис. 12 представлено схематическое изображение компоновки манипулятор-платформы, включающей симметрично расположенные относительно оси прокатки дуговые гребенчатые статоры, смонтированные на корпусе тренажера.

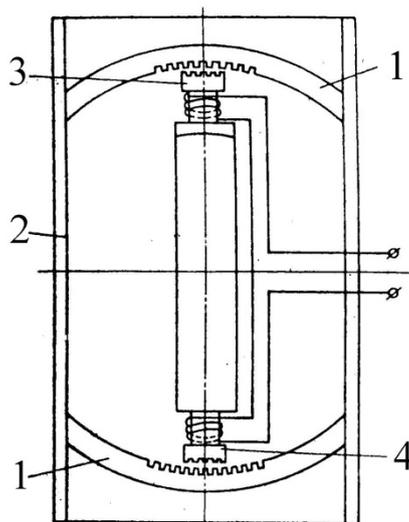


Рис. 12. Стенд для выставки и сборки гребенчатой электромагнитной системы

На симметрично расположенных дуговых гребенчатых статорах, имеющих дуговые направляющие, при помощи подшипников качения смонтирована качающаяся платформа, где смонтированы ответные части дуговых гребенчатых двигателей — индукторы с гребенчатым магнитопроводом и обмотками. Технологический процесс выставки выполняется следующим образом. Фиксируют элемент 1 электромагнитной системы на основании 2, генерируют электромагнитные поля индукторами 3 и 4, зубцы которых расположены напротив элемента 1, при этом зубцы индукторов 3, 4 и зубцы элемента 1 взаимно фиксируют. Затем производят фиксацию индукторов 3 и 4 друг относительно друга. Технологический процесс позволяет осуществить совмещение электромагнитных систем, расположенных на расстоянии, напротив друг друга без дополнительных приспособлений, усредняет ошибку шагов между зубьями гребенчатого магнитопровода за счет дифференциальной выставки зубчатых зон индукторов и якорей по максимуму магнитной проводимости.

На основе данного способа предложена компьютерная методика, разработан алгоритм и программное обеспечение для электромагнитного согласования ДС на основе ДЭМД.

На рис. 13 приведены кривые момента, полученные аналитически для ДС с согласованной – 1 и несогласованной – 2 электромагнитной системой. Кривая 2 получена для ДС, величина рассогласованности которой  $\Delta\varphi = 0.1 T_M$ , где  $T_M$  – период мотора.

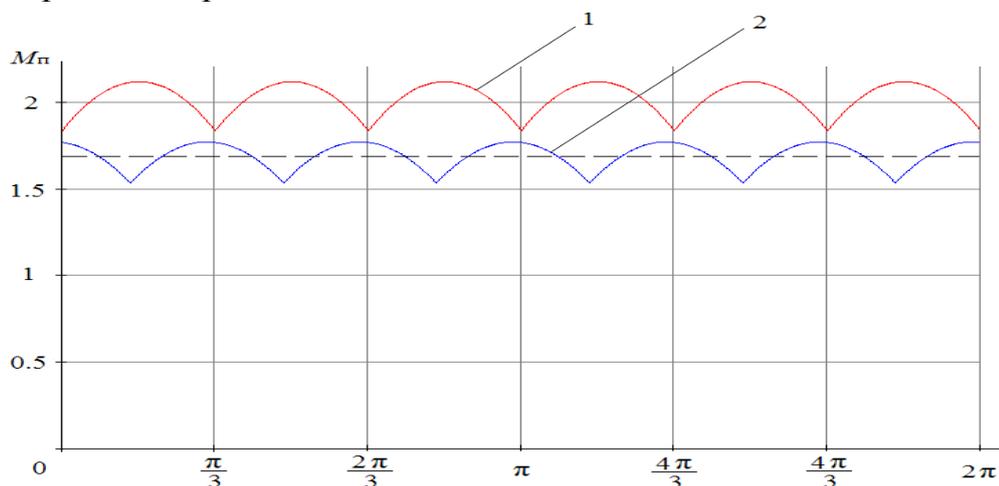


Рис. 13. Влияние рассогласованности электромагнитной системы на величину полезного момента, развиваемого ДС.

Электромагнитное согласование ДС в соответствии с предложенной методикой выполняется по схеме, представленной на рис. 12 и включает следующие шаги.

1. Индуктор 1 (рис. 13) устанавливают в посадочное место на основании 2 и фиксируют неподвижно относительно него при помощи крепежных винтов.

2. Индуктор 3 закрепляют на основании 2 подвижно таким образом, чтобы обеспечить возможность свободного перемещения его в круговом направлении относительно оси  $X$  на величину  $\pm\Delta = T_M/2$ . Для этого крепежные отверстия, при помощи которых осуществляется крепление индуктора 3 на неподвижном основании выполняют дугообразными.

3. Производят предварительное фиксирование индуктора 3 на основании 2 в среднем положении, симметрично относительно индуктора 1, путем затяжки крепежных винтов.

4. Демонтируют направляющие ролики 5 и на место штатного дугового ротора устанавливают технологический кольцевой ротор 4 (рис. 14, а).

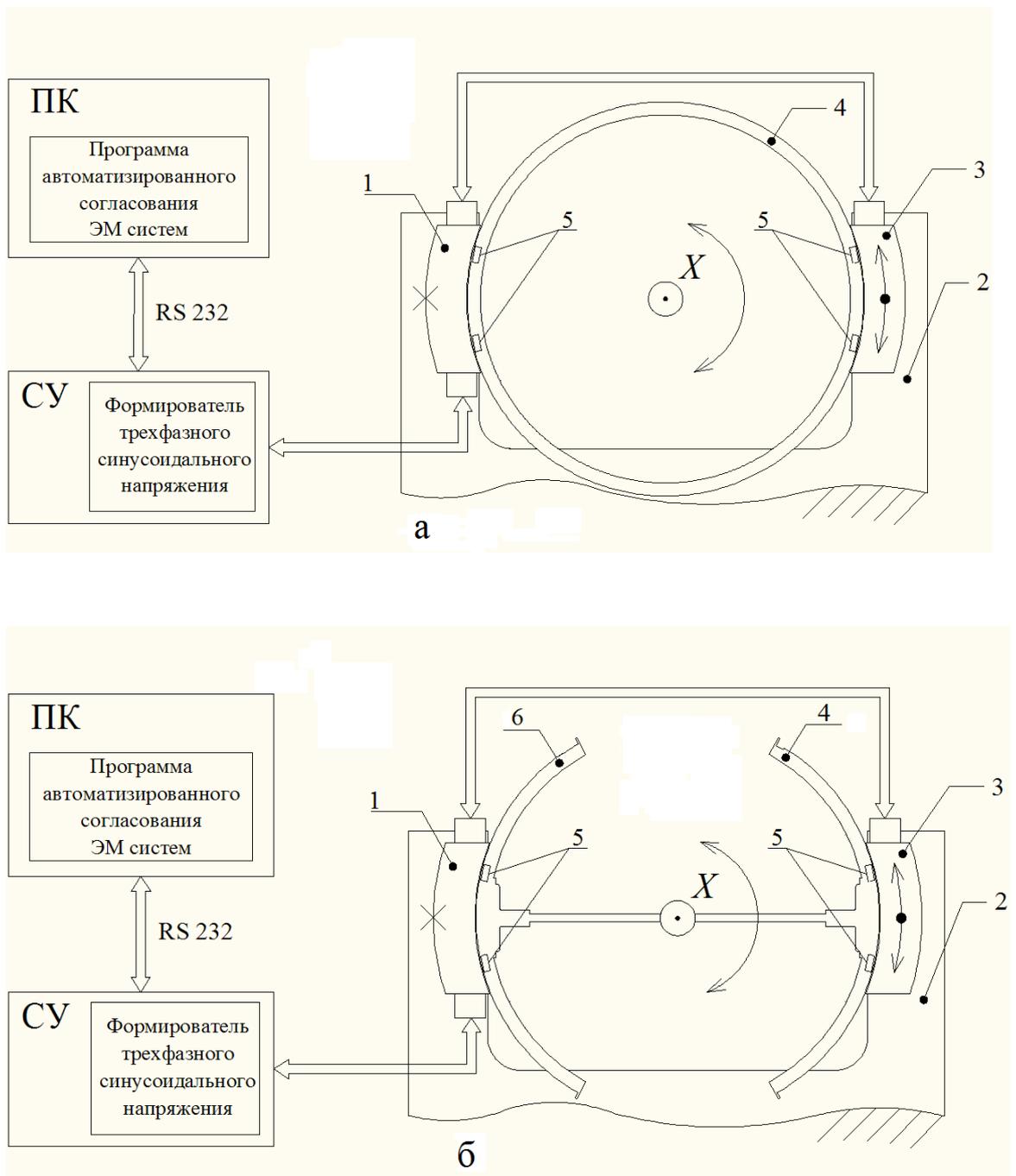


Рис. 14. Схема электромагнитного согласования ДС

В случае если производится согласование ранее собранной ДС, штатный дуговой ротор предварительно демонтируют. После установки технологического ротора ролики устанавливают на прежнее место. Перед установкой технологического ротора на его внешнюю поверхность закрепляют фторопластовую ленту, минимальная толщина которой должна составлять 0,4 мм. Фторопластовое покрытие необходимо для обеспечения низкого усилия трения при движении ротора, а также для установки требуемого рабочего зазора индуктор-ротор.

5. После установки технологического ротора ослабляют винты крепления индуктора 3 до тех пор, пока не будет обеспечено его свободное перемещение относительно основания 2 в круговом направлении. После ослабления винтов, под действием сил притяжения постоянных магнитов индуктор должен вплотную прижаться к ротору.

6. Обмотки индукторов 2 и 3 соединяют последовательно и подключают выводы обмоток к соответствующим клеммам формирователя трехфазного синусоидального напряжения СУ (рис. 14). На управляющем ПК запускают программу «Согласование электромагнитной системы ДС».

7. В главном окне программы (рис. 15) в поле «Установка связи с СУ» задают номер СОМ-порта, к которому подключена система управления и нажимают кнопку «Установить связь с СУ». При этом программой будут произведены соответствующие настройки связи с СУ. После того, как эта операция завершится, включают питание СУ.

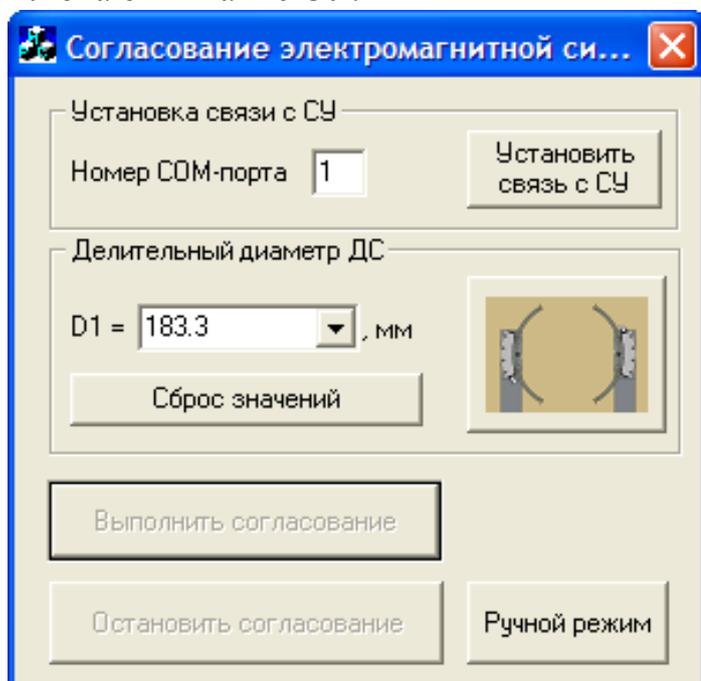


Рис. 15. Внешний вид главного окна программы электромагнитного согласования ДС на основе ДЭМД

8. В поле «Делительный диаметр ДС» главного окна программы производят выбор делительного диаметра согласуемой двухиндукторной системы. При необходимости смены выбранного значения делительного диаметра, например при ошибочном вводе или в случае необходимости согласования ДС с другим делительным диаметром, нажимают кнопку «Сброс значений» и затем производят выбор нужного диаметра из выпадающего списка.

9. Для выполнения согласования электромагнитной системы ДС в автоматическом режиме нажимают кнопку «Выполнить согласование» при этом производится подача питания в обмотки ДЭМД, выполняется перемещение

кругового ротора по заданному алгоритму. После завершения согласования выдается сообщение «Согласование завершено успешно». При этом обесточивания обмоток не происходит, ДС находится в зафиксированном состоянии. В случае возникновения каких-либо неполадок в процессе выполнения алгоритма согласования, выдается сообщение об ошибке. Для того чтобы выяснить на каком этапе возникает ошибка имеется возможность перехода в ручной режим управления ДС. Для этого необходимо нажать кнопку «Ручной режим». При этом в главном окне программы отобразятся два дополнительных поля. Поле «Отправленные» предназначено для ввода команд и последующей их отправки на СУ, поле «Полученные» предназначено для отображения ответных команд СУ.

10. Производят механическую фиксацию индуктора 3 на неподвижном основании 2 путем полной затяжки крепежных винтов. После этого отключают СУ, обесточивают обмотки ДЭМД.

11. Демонтируют направляющие ролики 5 и на место технологического ротора устанавливают штатный дуговой ротор 4 с подвижным элементом 6 (рис. 3.36, б). После установки штатного ротора ролики монтируют на прежнее место.

12. Включают питание СУ, и в главном окне программы нажимают кнопку «Зафиксировать» при этом производится настройка параметров время-токовой защиты ДЭМД, устанавливается максимально допустимый ток и производится подача питания в обмотки ДЭМД. При этом под действием электромагнитных сил подвижный элемент 6 перемещается в круговом направлении относительно дугового ротора 4, магнитные полюса дугового ротора 4 согласуются с магнитными полюсами индукторов 1, 3 за счет подвижного элемента 6 дугового ротора.

13. Производят механическую фиксацию подвижного элемента 6 дугового ротора относительно корпуса дугового ротора 4. В главном окне программы нажимают кнопку «Расфиксировать», при этом приостанавливается подача питания в обмотки ДЭМД, затем выключают СУ.

Блок-схема алгоритма программы автоматического электромагнитного согласования ДС представлена на рис. 16, 17.

Предложенная методика упрощает технологию электромагнитного согласования двухиндукторных систем на основе ДЭМД в процессе сборки за счет исключения кондукторов, оправок и высокоточного метрологического оборудования, повышает производительность труда за счет автоматизации процесса согласования, а также улучшает точность сборки. Таким образом, в случае применения предложенной методики удастся добиться высоких технико-эксплуатационных характеристик ДС на основе ДЭМД не прибегая к технически сложным способам согласования электромагнитных систем.

### Вопросы для самоконтроля знаний

1. От чего зависят технико-эксплуатационные показатели функционирования двухиндукторной системы на основе ДЭМД ?
2. Что нужно сделать чтобы избежать снижения силовых характеристик двигательной системы (ДС)?
3. Дайте схематическое изображение компоновки манипулятор-платформы.
4. Как влияет рассогласованность электромагнитной системы на величину полезного момента, развиваемого ДС?

### 3.7. Взаимовлияние координат на точностные и качественные показатели электромехатронного модуля

Наиболее актуальной задачей проектирования многокоординатных электромеханических модулей является кинематическая развязка движений электроприводов координат. Наиболее эффективная кинематическая развязка движений координатных приводов, обеспечивающая точность и управляемость, возможна лишь с применением электроприводов прямого действия.

Проблемы механических связей определяются кинематическим исполнением электромеханизма основных движений и включают в себя следующие вопросы:

1) силовые взаимодействия в многокоординатной системе из-за принятой нетрадиционной кинематической концепции опор — вопросы оптимизации схемотехнических решений, лежащих в области новых материалов и технологий;

2) силовые взаимодействия в многокоординатной системе с традиционными кинематическими опорами из-за технологических погрешностей изготовления деталей и сборки узлов, временных деформаций и износа в них — вопросы кинематической точности, являющиеся общими теоретическими и практическими задачами электротехнологий.

Конструкции опор многокоординатных операционных автоматов должны отвечать ряду требований:

- 1) свободное одновременное перемещение по заданным координатам;
- 2) высокая жесткость опоры;
- 3) минимальное сопротивление движению;
- 4) минимальная величина и равномерность воздушного зазора  $\Delta$  В магнитной системы линейного или дугового гребенчатого электродвигателя по всей активной поверхности;
- 5) независимость зазора  $\Delta$  В от величины нормальных электромагнитных сил притяжения статора и ротора.

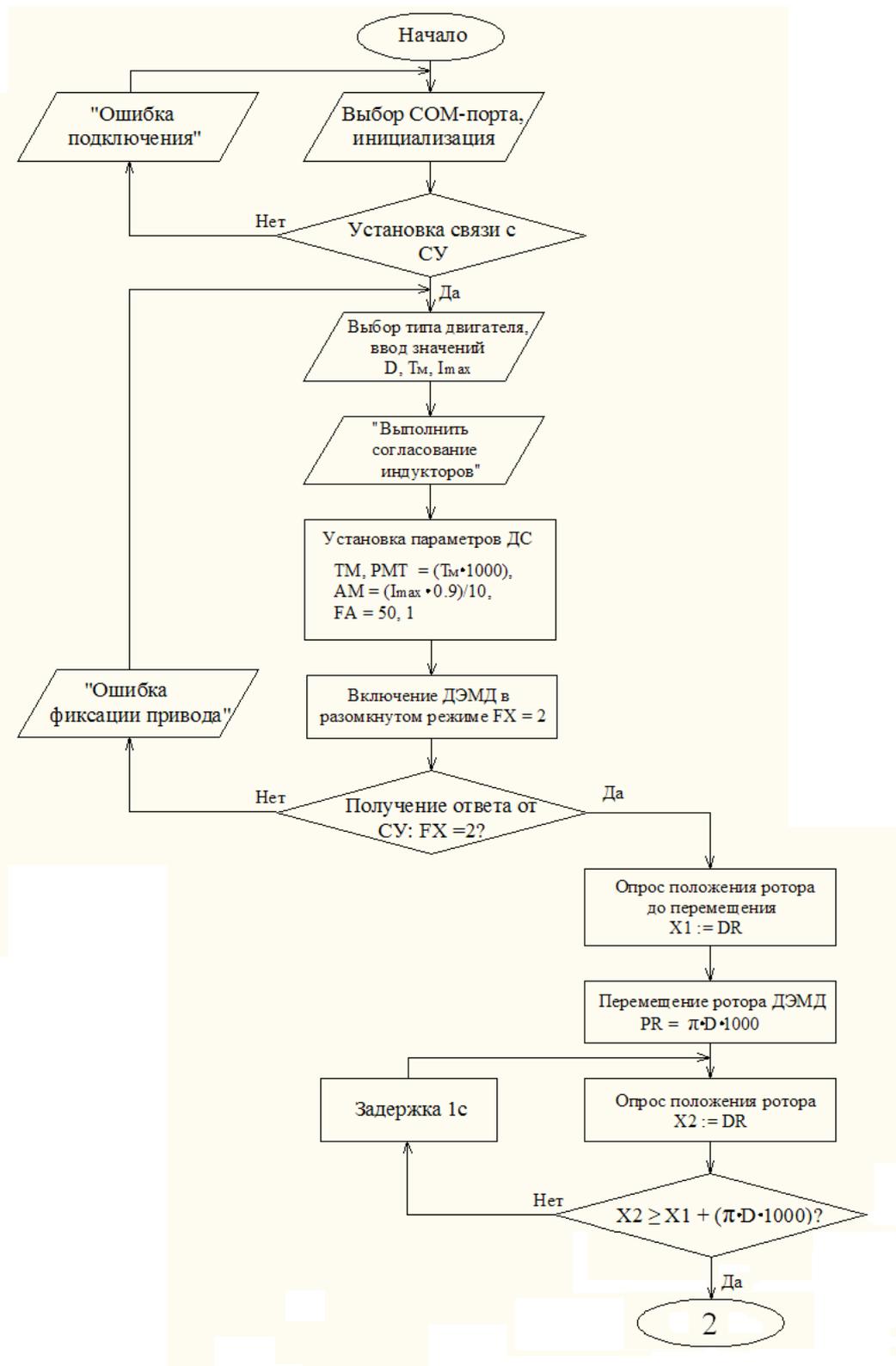


Рис. 16. Блок-схема алгоритма программы автоматического электромагнитного согласования ДС (начало)

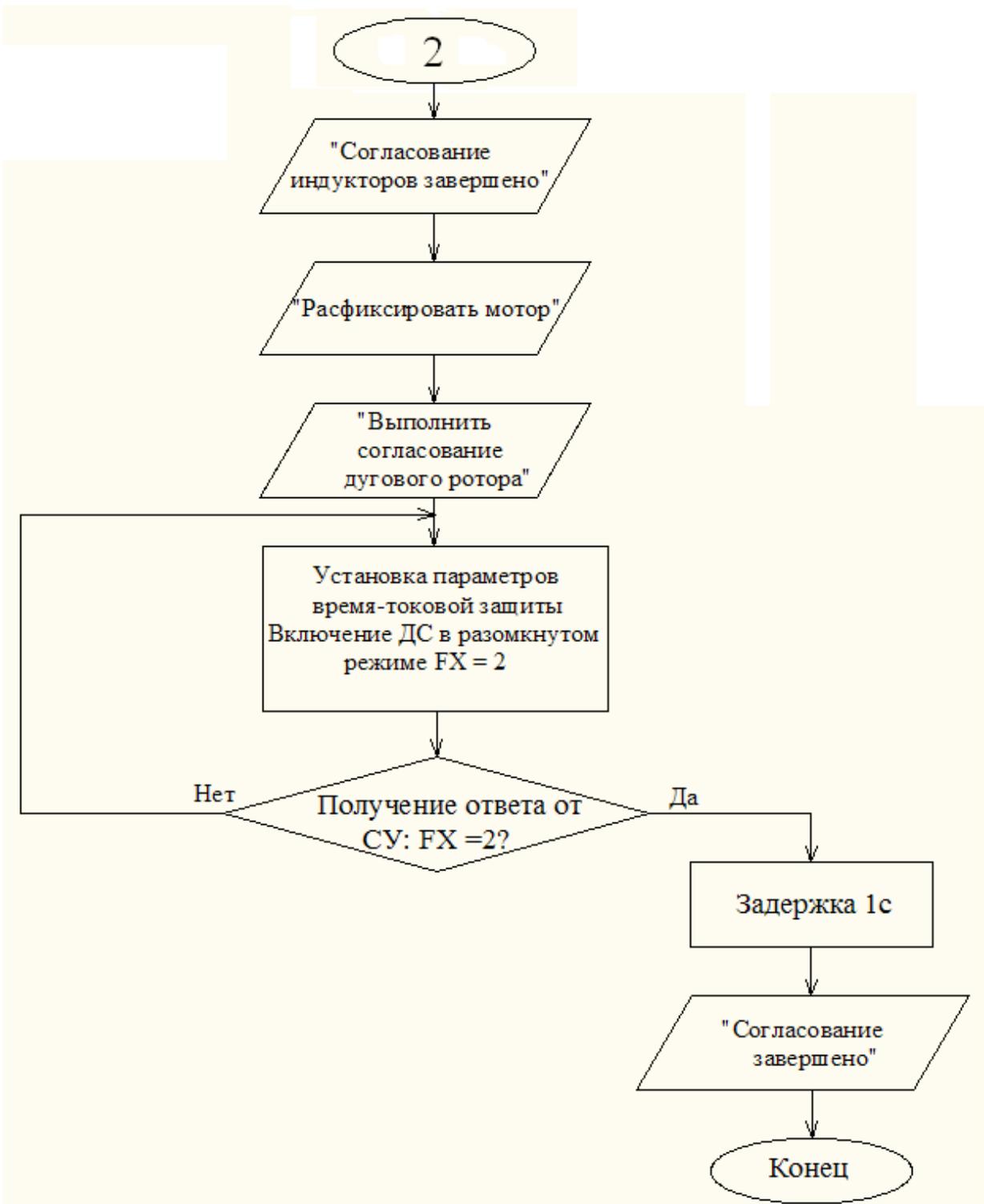


Рис. 17. Блок-схема алгоритма программы автоматического электромагнитного согласования ДС (окончание)

Этим требованиям, в основном, отвечают многокоординатные системы с нетрадиционной кинематической концепцией опор, например, с аэростатическими и магнитными опорами. Но использование аэростатических и магнитных опор приводит к некоторому усложнению конструкций и удорожанию электромехатронных модулей.

Требования 1,2 характеризуют именно геометрию – кинематику многокоординатной конструкции, а требования 3–5 относятся в основном, к динамике многокоординатной конструкции. Поэтому в работе рассматриваются требования к кинематике. Особенно важно первое требование — это, в первую очередь, ортогональность всех трех координат во всем рабочем диапазоне — повороте платформы стенда-тренажера. Неортогональность проявляется в повышенном моменте нагрузки ЭПД звена, неточной обработке заданной координаты или позиции в системе основных координат  $Oxy$ , которые из-за допусков изготовления отдельных деталей, носят случайный характер.

В настоящей работе рассматривается стенд-тренажер для регулировки и испытания навигационного оборудования. Вновь устанавливаемое и находящееся в эксплуатации навигационное оборудование подвергается приемным испытаниям, целью которых является установление технической исправности и соответствие технико-эксплуатационным характеристикам технических условий. Приемные испытания включают заводские стендовые испытания. Стендовые испытания выполняются на специальных трехступенных качалках-стендах, имеющих платформу, на которую устанавливается испытываемое навигационное оборудование, например, гироскоп. Трехступенные качалки-стенды, имитирующие морскую качку, адекватно реальным условиям, можно отнести к классу многокоординатных операционных автоматов, осуществляющих технологический процесс перемещения изделия в пространстве.

Рассматриваемый стенд-тренажер в соответствии с классификацией МЭСД, описанных в [31], есть электромеханизм типа ЮМО-2-2-2 с дуговыми ЭПД, и расположение зубцовых зон электродвигателя по вертикальной оси – вертикальное (рис. 18).

Для оценки геометрии — кинематики многокоординатной конструкции в части допустимой неортогональности координатных электромеханизмов — принимаем, что любая дуга есть прямая. Тогда мы вправе определять детерминированную величину допустимой неортогональности — отклонение от истинного положения рабочего органа (платформы стенда-тренажера), выражением

$$\Delta \mathcal{R} = \Delta l_{xyz}^* = \frac{l_0}{\hat{E}_{\ddot{A}}} > \sqrt{l_0^2 (\operatorname{tg}^2 \varphi_x + \operatorname{tg}^2 \varphi_y + \operatorname{tg}^2 \varphi_z)}, \quad (34)$$

где  $l_0$  — величина основного шагового интервала;  $K_d$  — коэффициент деления основного шагового интервала;  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  — угловые отклонения геометрии

осей координатных приводов стенда-тренажера.

Неортогональность проявляется в неточной отработке заданного положения платформы  $\Pi$  в системе координат  $O_1C_1\theta_1\psi_1$ , которая из-за допусков изготовления отдельных деталей носит случайный характер.

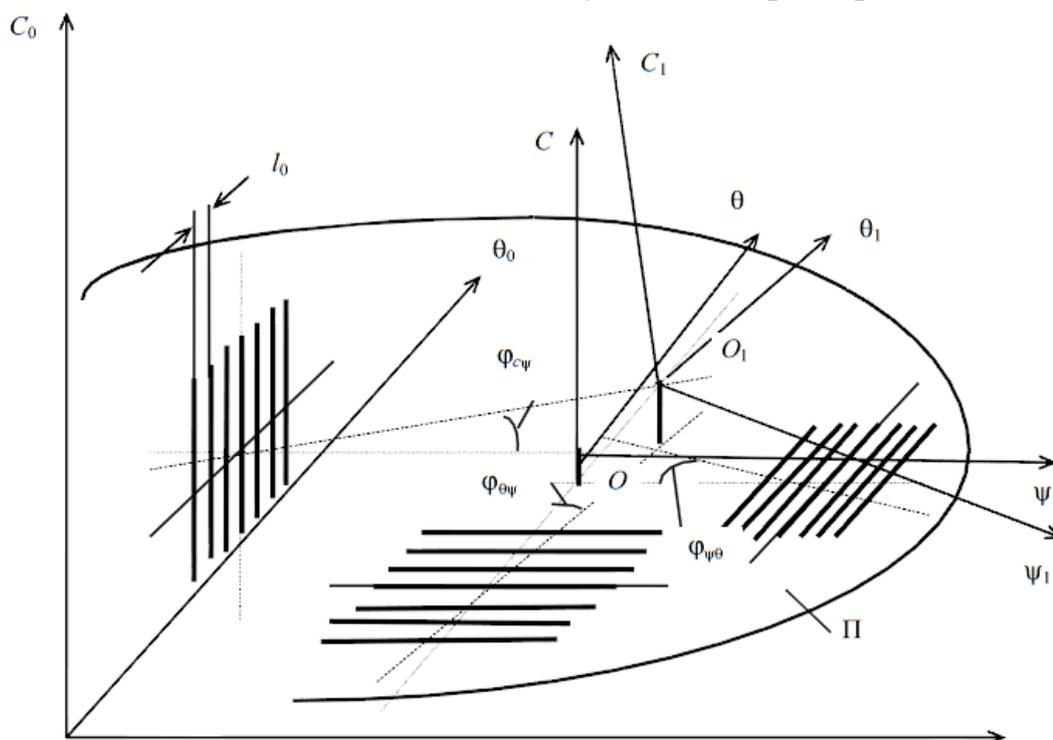


Рис. 18. Проекция зубцовых зон дуговых электродвигателей стенда-тренажера

Указанный алгоритм можно применять для оценки геометрии трехстепенного электромеханизма при проектировании и цифровом моделировании стендов-тренажеров с ЭПД, как условие обеспечения точности, принятое постановщиком задачи на основе теоретических знаний, опыта и интуиции, что дает возможность практического проектирования совершенных и рациональных многокоординатных электромехатронных модулей.

Неортогональность проявляется также в повышенном усилии или моменте нагрузки ЭПД звеньев, что существенно влияет на эффективность кинематической развязки движений координатных приводов с ЭПД. Поэтому при проектировании и цифровом моделировании необходимо принимать ограничения по возможным усилиям или моментам при движении звеньев координатных приводов в режиме холостого хода. Эти ограничения можно привязать к величине  $\Delta m$  – относительной неуравновешенности двухмассовой ЭПД, которая характеризуется величиной  $A_T$ , определяющей нагрузочную характеристику платформы стенда-тренажера. Величина максимально допустимой относительной неуравновешенности должна лежать в пределах

$$|A_T| < \Delta m_{\max} < 0,01.$$

### Вопросы для самоконтроля знаний

1. Что подразумевают под кинематической развязкой движений электроприводов координат?
2. Назовите проблемы механических связей.
3. Каким требованиям должны отвечать конструкции опор многокоординатных операционных автоматов?
4. Для чего предназначен стенд-тренажер?
5. Где расположены зубцовые зоны электродвигателя?

### 3.8. Классификация мультикоординатных систем движения с интеллектуальным управлением

Развитие мехатроники продолжается и в новых прорывных направлениях науки и техники, и в «старых» областях, в которых требуется высокое качество исследований и производство новых видов изделий.

Оно обусловлено развитием микроэлектроники и компьютерных технологий, созданием новых электротехнических материалов. Вот уже 15–20 лет на стыке электромеханики, электроники и компьютерных технологий выделяется область мехатроники, названная исследователями «электромехатроника» (или «электромеханотроника»), обеспечивающая исследование и разработку интеллектуальных (самоуправляемых, самодиагностируемых и защищаемых от внешних воздействий), а также мультикоординатных устройств преобразования электрической и механической энергии.

В связи с этим актуальность и необходимость развития и уточнения понятия «мехатроника» для конкретных исследований и производства новых изделий в соответствии с Перечнем критических технологий, например, по признакам «приводные устройства», кинематическая мультикоординатная комбинаторика» и «интеллектуальное управление», очевидны.

*Развитие механической парадигмы мехатроники по признаку «приводные устройства».* Известна компонента классической мехатроники – «механика», определяющая механическую парадигму ее развития и содержащая компоненты: электромеханические, гидравлические, пневматические, пьезострикционные, пружинные и другие приводные устройства, конструкционные элементы точной механики и др. Очевидно, что многообразии разнородных и специальных технических элементов компоненты «механика» в термине «мехатроника» естественно разделяет профессиональные исследования в академических и отраслевых НИИ, вузах,

в зависимости от их специализации и материально-технической базы, на отдельные направления. Классификация чрезвычайно широкой области «мехатроника» на более конкретные и узкие направления по определенным признакам применения специализирует и улучшает качество исследований. Например, классификация по различным типам приводных устройств и их компонентов, так как различные типы приводов отличаются физической природой и конструктивными особенностями, статическими и динамическими характеристиками функционирования, системами управления и т.п.

Исследователи, разрабатывающие теорию и методологию мультикоординатных систем движения на основе линейных и дуговых электромехатронных модулей [19–26], с целью установления и углубления границ ниши этих специализированных исследований, предлагают классификацию понятия «мехатроника», представленную несколькими уровнями, позволяющую закрепить и расширить понятие второго уровня «электромехатроника», существующее ранее, и дать понятие третьего уровня «элементы электромехатроники» для мультикоординатных систем движения с интеллектуальным управлением.

Третий уровень по составу и качеству элементов находится всегда в постоянном развитии, обусловленном появлением новых электронных компонентов, конструкционных материалов и материалов электротехники, совершенствованием компьютерных технологий.

На рис. 19 представлена графическая иллюстрация развития понятия «мехатроника», включающая:

1-й уровень – содержащий понятие «мехатроника», состоящее из компонентов механики, электротехники, электроники и компьютерных компонентов;

2-й уровень – содержащий понятие «мехатроника» по признаку «приводные элементы» (ПЭ): электромеханический, гидравлический, пневматический, пьезострикционный, пружинный и др.;

3-й уровень – содержащий понятие «электромехатроника» по признакам «кинематическая мультикоординатная комбинаторика» и «интеллектуальное управление», в котором происходит синергетическая интеграция компонентов: механики (конструктивных элементов и т.п.); электротехники (электрические обмотки, магнитопроводы из электротехнической стали и с постоянными магнитами, магнитная лента и обмотки считывания датчика обратной связи, устройства сенсорики и т.п.); электроники (аппаратная часть планировщика мультикоординатных движений (ПМД), электронного силового блока управления и т.п.); компьютерной компоненты (алгоритмическо-программная часть ПМД, выполненная на методах с применением пространства конфигураций, нейротехнологий и т.п.).

В работе [13] была предложена классификация операционных

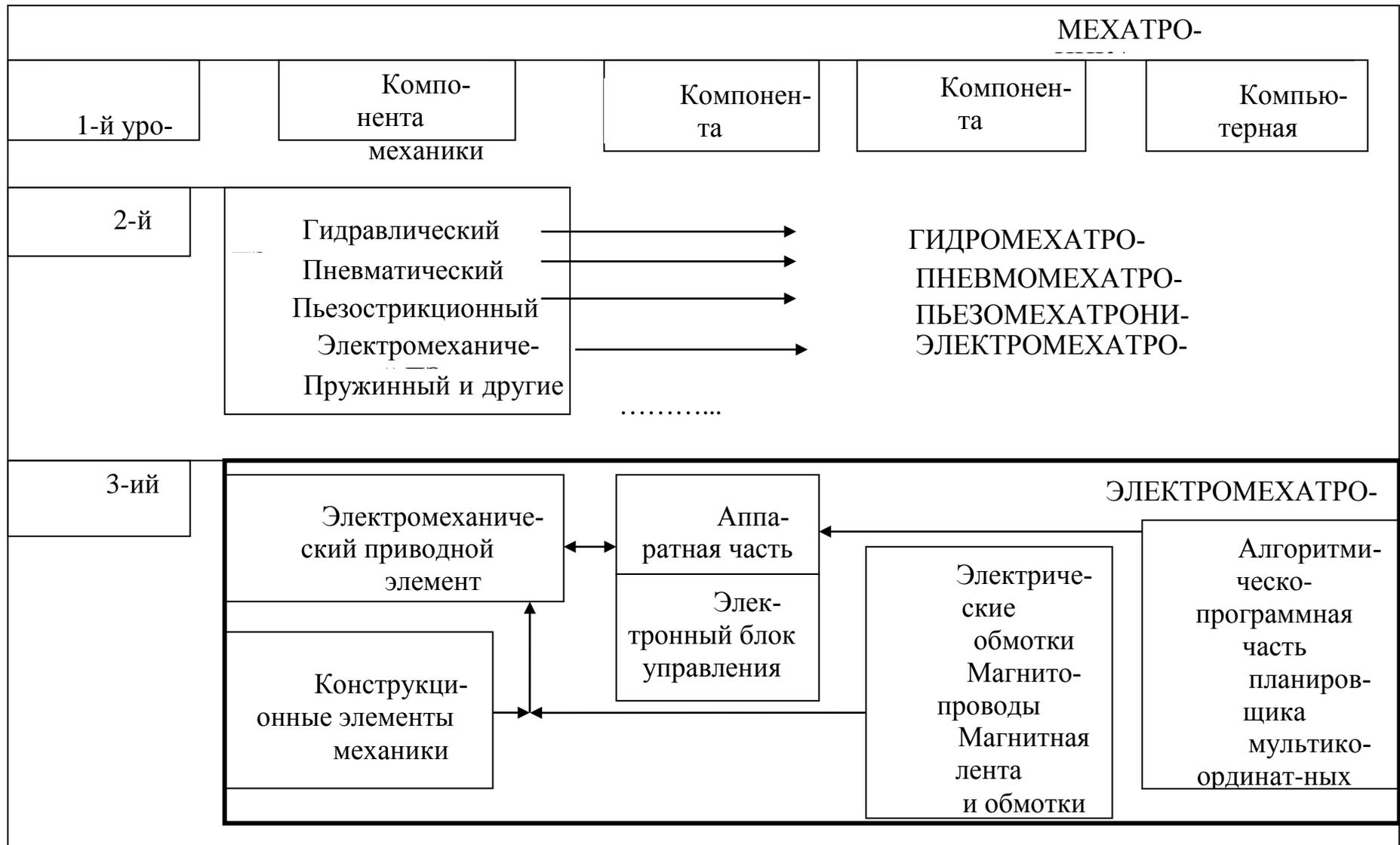


Рис. 19. Графическая иллюстрация понятия «электромехатроника»

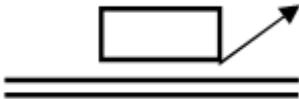
автоматов на основе линейных и дуговых электроприводов прямого действия (далее линейных и дуговых электромехатронных модулей движения – ЛЭМД и ДЭМД) по признаку «число степеней подвижности». В настоящей монографии приводится классификация мультикоординатных автоматов на основе линейных и дуговых электроприводов прямого действия (далее линейных и дуговых электромехатронных модулей движения – ЛЭМД и ДЭМД) по признаку «число степеней подвижности». В настоящей монографии приводится классификация мультикоординатных электромехатронных систем движения (МЭМСД) по признаку «кинематическая мультикоординатная комбинаторика» (табл.4). Это уточнение признака классификации отражает не только количество степеней подвижности, но и возможность комбинаций кинематических движений при синергетической интеграции.

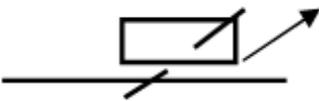
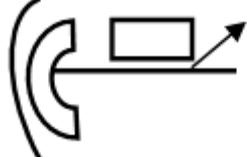
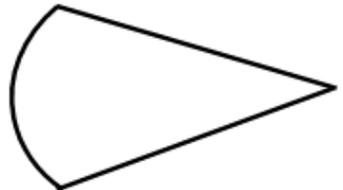
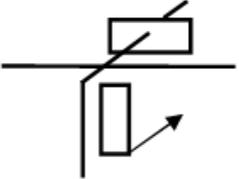
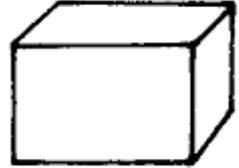
На основе однокоординатных ЛЭМД и ДЭМД возможно построение (компоновка) МЭМСД для линейных и сложных криволинейных перемещений рабочего органа. Для классификации МЭМСД важно учесть их потребительские свойства. К ним, кроме точности и повторяемости движений, быстроедействие и грузоподъемности, относятся также свойства, зависящие от числа степеней подвижности МЭМСД и его конструктивных особенностей: рабочее пространство и производительность. Рабочее пространство МЭМСД организуется различной комбинацией степеней подвижности рабочего органа в прямоугольной, цилиндрической угловой и сферической системах координат. В таблице представлена классификация МЭМСД по признаку «кинематическая мультикоординатная комбинаторика».

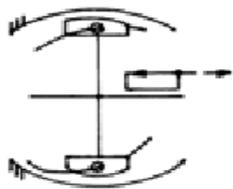
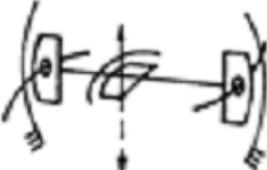
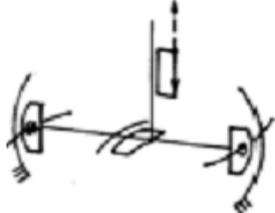
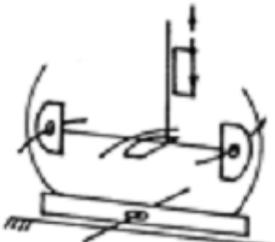
*Развитие компьютерной парадигмы мехатроники по признаку «интеллектуальное управление».* Известна «компьютерная компонента» управления устройствами мехатроники, использующая традиционные методы алгоритмизации рабочего пространства. Исследования и разработки МЭМСД вносят определенную специфику в возможности интеллектуального

Таблица 4

Классификация МЭМСД по признаку «кинематическая мультикоординатная комбинаторика»

Наименование ЛЭМД и ДЭМД	Технические характеристики	
	Число степеней подвижности	Конфигурация рабочего пространства
1	2	3
1. ЛЭМД «ЮМО-1» 	1	
2. ДЭМД «ЮМО-2»		

	1	
3. Плоскостной двухкоординатный ЛЭМД «ЮМО-1.1» 	2	
4. Сферический двухкоординатный ДЭМД «ЮМО-2.2» 	2	
5. Плоскостной двухкоординатный Д-Л-ЭМД «ЮМО-2.1» 	2	
6. Плоскостной двухкоординатный «ЮМО-1.2» 	2	
1	2	3
7. Объемный двухкоординатный «ЮМО-1-2» 	2	
8. Объемный линейный трехкоординатный «ЮМО-1-1-1» 	3	
9. Сферический объемный «ЮМО-		

<p>2-2.1»</p> 		
<p>10. Сферический объемный «ЮМО-2-2.2»</p> 		
<p>11. Сферический объемный «ЮМО-2-2.2-1»</p> 		
<p>12. Сферический объемный «ЮМО-1.1-2-2.2-1»</p> 		

управления мехатроники, присущая всем современным автоматизированным устройствам и т.п., касающаяся адаптивного и интеллектуального

Это создание аппаратно-программных устройств (АПУ) ПМД, определяющих оптимальные пути движения звеньев МЭМСД на основе методов пространства конфигураций и т.п. Эти методы возможно применить и для интеллектуального управления другими типами приводных устройств, но исследования показали, что наибольший синергетический эффект мы получаем применяя его в электромехатронике, благодаря наличию «электронного редуктора», отличной электрической сочетаемости электроники АПУ ПМД и электронного силового блока управления электродвигателями, например, в построении обратных связей не только для оптимальной отработки движения, но и для возможностей самоуправления и самодиагностирования выработанной АПУ ПМД параметров. На рис. 20 представлена классификация для МЭМСД по признаку «интеллек-

туальное управление», с возможностями самоуправления, самодиагностирования и защиты от внешних воздействий.

Итак, анализ мирового и российского опыта позволяют уточнять понятие первого уровня «мехатроника» по признаку «приводные устройства» и развивать понятие второго уровня «электромехатроника» для исследований и разработок мультикоординатных электромехатронных систем движения по критериям третьего уровня «кинематическая мультикоординатная комбинаторика» и «интеллектуальное управление».

### **Вопросы для самоконтроля знаний**

1. По каким признакам классифицируют мехатронные системы?
2. Что называют числом степеней подвижности?
3. Что такое рабочее пространство манипулятора?
4. Приведите пример самых простых рабочих пространств манипуляторов.
5. Что подразумевают под интеллектуальным управлением?

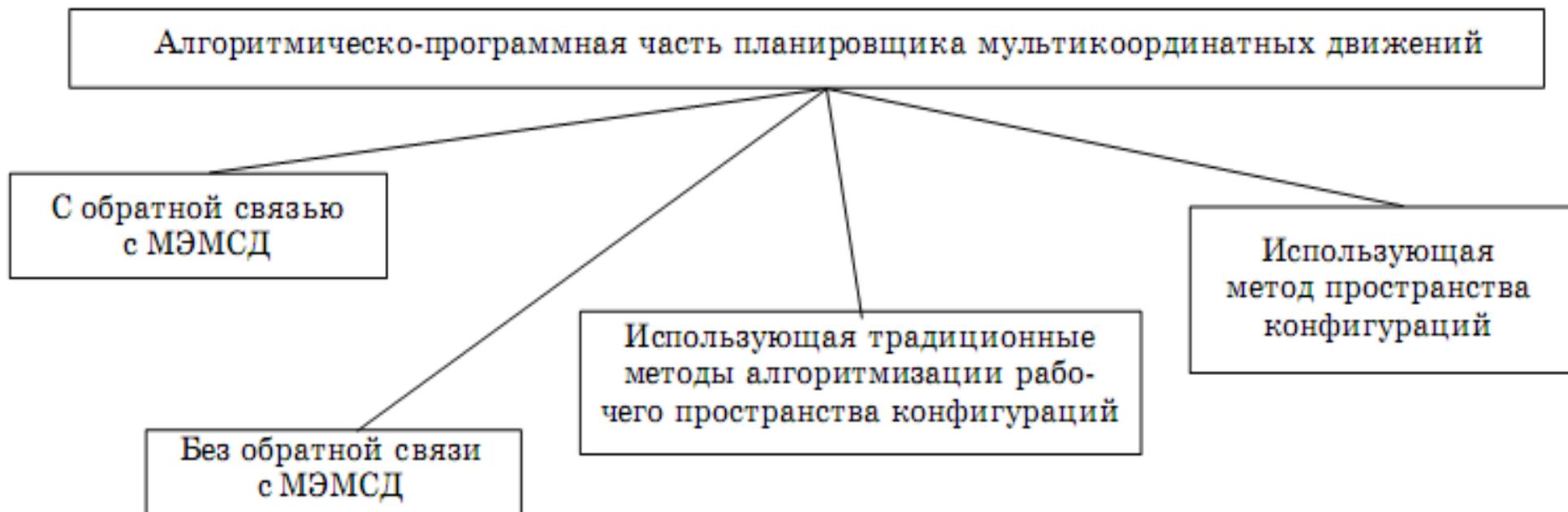


Рис. 20. Классификация МЭМСД по признаку «интеллектуальное управление»

#### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНО РАБОТЕ

Структура самостоятельной работы представлена в таблице 5.

№ п/п	Виды самостоятельной работы (детализация)	Трудоемкость (час)	Контроль выполнения работы (Опрос, тест, дом. задание и т.д.)
1.	Проработка лекционного материала (~0,5 час на 2 часа лекции)	4	Опрос (тест, домашнее задание или другие формы внутрисеместрового контроля)
2.	Подготовка к практическим занятиям, семинарам (~0,5-1 час на 2 час. занятие).	9	Опрос, (тест, проверка на прак. занятиях или др. формы внутрисеместр. контроля)
3.	Изучение тем (вопросов) теоретической части курса, отводимых на самостоятельную проработку.	23	
3.1.	Обеспечение качества функционирования МЭСД	13	Проверка конспектов самостоятельного изучения
3.2.	Экспериментальные исследования МЭСД	10	Проверка конспектов самостоятельного изучения
4	Подготовка и сдача экзамена	36	
ИТОГО		90	

Для выполнения задания по самостоятельной работе необходимо в литературных источниках указанных ниже найти сведения по темам заданий и составить конспект самостоятельного изучения.

#### Список литературы

1. Осипов О.Ю. Мультикоординатные электромехатронные системы движения / О.Ю. Осипов, Ю.М. Осипов, С.В. Щербинин. - Томск: Изд-во ТУСУР, 2010. – 320 с.

2. Завьялов Ю.С. Слайны в инженерной геометрии / Ю.С. Завьялов, В.А. Леус, В.А. Скороспелов. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.

3. Иванов Г.С. Конструирование технических поверхностей (математическое моделирование на основе нелинейных преобразований) / Г.С. Иванов. – М. : Машиностроение, 1987. – 192 с.

4. Щербинин С.В. , Осипов Ю.М. Геометрическое обеспечение работы многокоординатных операционных автоматов // Автоматизация и современные технологии. – 1999. – № 8. – С. 2-3.

4. Тертышный В.Т. Программирование перемещений при роботизированной сварке криволинейных швов // Автоматическая сварка. – 1993. – № 3. – С. 48-52.

6. Комзолов С.В., Медведев Д.А., Негодяев С.В. Аппаратно-программная система управления электромехатронным модулем движения / Матер. VI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», 13-16 окт. г. Томск. – Томск, Изд-во , 2010, с.

7. Комзолов С.В., Негодяев С.В., Щербинин С.В. Алгоритмы оптимизации траекторий перемещений многокоординатного манипулятора путем расслоения пространств конфигураций / Матер. VI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», 13-16 окт. г. Томск. – Томск, Изд-во , 2010, с.

8. Комзолов С.В., Медведев Д.А., Негодяев С.В. Аппаратно-программная система управления электромехатронным модулем движения / Инновационные технологии управления. Электромехатроника: сборн. трудов Отделения кафедры ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии» / под ред. проф. Ю.М. Осипова. – Томск: Изд-во ТУСУРА, 2010. – Вып. 2 – 106 с.

9. Комзолов С.В., Негодяев С.В., Щербинин С.В. Алгоритмы оптимизации траекторий перемещений многокоординатного манипулятора путем расслоения пространств конфигураций / Инновационные технологии управления. Электромехатроника: сборн. трудов Отделения кафедры ЮНЕСКО «Новые материалы и технологии» / под ред. проф. Ю.М. Осипова. – Томск: Изд-во ТУСУРА, 2010. – Вып. 2 – 106 с.

10. Осипов Ю.М., Свечарник Д.В. Графопостроители с линейным электроприводом // Приборы и системы управления. – 1981, – № 5.

11. Роботы с приводом прямого действия. Аналитический обзор / науч. рук. Б.В. Гришин.-М.: ВНИИТЭМР, 1991.

12. Изыскание путей создания манипуляционных систем с безредукторным электроприводом с непосредственным управлением: отчет о НИР / Том. политех. ун-т ; рук. Ю.М. Осипов. – Томск, 1991.– № ГР 01910007623. – Инв. № 02920001318.

13. Осипов Ю.М. Оценка качества безредукторного манипулятора по параметрам неуравновешенности / Ю.М. Осипов // Бюл. произв.-техн. опыт. – М. : ЦНТИ Поиск, № 11, 1990.

14. Осипов Ю.М. Симметричная технологическая среда автоматизированных комплексов // Автоматизация и современные технологии. – 1996. –№ 11. – С. 3-4.

15. Маков Ю. Л. Качка судов. Учебное пособие. Издательство КГТУ, Калининград, 2007.

16. ГОСТ 12.1.012-90. Вибрационная безопасность. Общие требования.

17. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М. Стенд-тренажер орбитальной качки Сборн. труд. межд. НПК «Теория и практика имитационного моделирования и создания тренажеров». – Пенза, 1999. – С.78-80.

18. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М. Влияние кинематики координатных приводов на точностные характеристики стенда-тренажера // Автоматизация и современные технологии. – № 2, 2000.

19. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М. Операционные автоматы специализированных систем и технологических комплексов / Труды 2-й Всеросс. НТК по проблемам создания перспективной авионики, 15-17 апр.2003 г., г. Томск..

20. Осипов О.Ю., Осипов Ю.М. Лазерная технологическая установка с многокоординатным столом-манипулятором / Труды II Росс. мультikonф по управлению. Мехатроника, автоматизация, управление. 2008, Санкт-Петербург – СПб, 2008
21. Мехатроника: пер. с яп. / Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ и др. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
22. ГОС ВПО. Государственные требования к минимуму содержания и уровню подготовки инженера по специальности 071800 «Мехатроника». – М., 1995. – 21 с.
23. Егоров О.Д. Мехатронные модули. Расчет и конструирование: учеб. пособие / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев. – М.: МГТУ «Станкин», 2004. – 360 с.
24. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
25. Горитов А.Н. Моделирование адаптивных мехатронных систем / А.Н. Горитов, А.М. Кориков. – Томск: В-Спектр, 2007. – 292 с.
26. ФГОС ВПО. Направление подготовки 221000 «Мехатроника и робототехника». – М., 2009. – 23 с.
27. Теряев Е.Д. Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы / Е.Д. Теряев, Н.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – № 1. – С. 2–14.
28. Коськин Ю.П. Проблемы и перспективы современного развития электромехатроники / Ю.П. Коськин, В.Д. Путов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2000. – № 5. – С. 5–9.

## **МУЛЬТИКООРДИНАТНЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ДВИЖЕНИЯ**

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплинам: «**Мультикоординатные электромехатронные системы движения**» для магистрантов 6 курса, обучающихся по направлению 221000.68 «Мехатроника и робототехника» по магистерской программе «Проектирование и исследование мультикоординатных электромехатронных

систем движения"

Составитель

Щербинин Сергей Васильевич

Подписано к печати

Формат 60x84/16. Бумага офсетная

Печать RISO. Усл.печ.л. Уч.-изд.л.

Тираж 50 экз. Заказ . Бесплатно