

за счёт встроенной системы формальной проверки синтаксиса является синтаксически корректной, вследствие чего уменьшается время цикла разработки программного обеспечения и расширяется круг специалистов, использующих параллельные вычисления в своей работе. Определены дальнейшие пути совершенствования системы «Интерактивная НОРМА», направленные на повышение быстродействия программ в результате учёта сочетания архитектурных особенностей ЭВМ и стандартов языков программирования.

### Библиографические ссылки

1. **Лацис А.О.** Как построить и использовать суперкомпьютер. М.: Бестселлер. 2003. 240 с.
2. **Система** построения параллельных программ [Электронный ресурс]. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2009. Режим доступа: <http://www.keldysh.ru/pages/poema> (дата обращения 15.11.2009).
3. **Норма.** Описание языка. Рабочий стандарт. А.Н. Андрианов, А.Б. Бугеря, К.Н. Ефимкин, И.Б. Задыхайло // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. № 120. М., 1995. 50 с.

УДК 621.315.592

В.А. Васин, канд. техн. наук, доц., Е.Н. Ивашов, д-р техн. наук, проф., А.П. Лучников, С.В. Степанчиков, канд. техн. наук

(Московский государственный институт электроники и математики)

vacuumWa@list.ru

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ МНОГОСТЕПЕННЫХ ПРИВОДОВ В ОБОРУДОВАНИИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

*Рассмотрены вопросы применения многокоординатных исполнительных устройств в оборудовании электронной техники. Показано, что существенное повышение эксплуатационных характеристик оборудования электронного машиностроения может быть достигнуто за счёт использования устройств на основе  $\ell$ -координат, которые по сравнению с традиционными исполнительными устройствами могут одновременно выполнять функции манипуляторов, транспортных устройств, гасителей колебаний и др.*

**Ключевые слова:** многокоординатные исполнительные устройства, оборудование электронной техники, многостепенные приводы,  $\ell$ -координатные приводы.

*Application questions of the multicoordinate efficient facilities in the electronic engineering equipment are considered. It is shown that essential operational behaviors growth of the electronic engineering industry can reach through the use of the facilities with  $G$ -coordinate. These facilities unlike other traditional efficient facilities can simultaneously fulfil functions of manipulators, transport facilities, dampers and etc.*

**Key words:** multicoordinate efficient facilities, electronic engineering equipment, multiphase drives,  $\ell$ -coordinate drives.

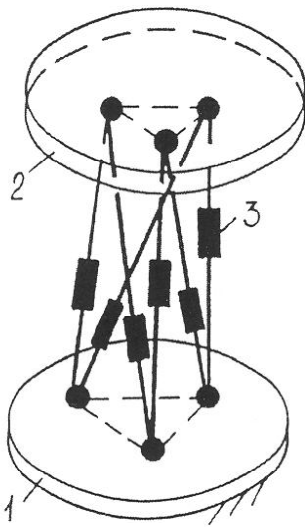
Положение твёрдого тела в пространстве относительно любой системы координат определяется шестью числами – угловыми и линейными величинами. В системе, построенной по структуре  $\ell$ -координат [1], в качестве таких чисел используются длины  $\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_6$  шести отрезков, соединяющих выходное звено с неподвижным основанием таким образом, что при заданных значениях  $\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_6$  образуется геометрически неизменяемая структура. В отличие от общепринятых уравнений движения свободного твёрдого тела с использованием углов Эйлера, уравнения движения в  $\ell$ -координатах описывают движение тела только в линейных величинах.

Общее свойство  $\ell$ -координат заключается в том, что они образуют пространственные фермы,

стержнями которых являются отрезки  $\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_6$ , а сферические шарниры расположены в точках выходного звена и неподвижного основания, соединённых этими отрезками.

Исполнительное  $\ell$ -координатное устройство (рис. 1) содержит неподвижное основание 1 и выходное звено 2, соединённые между собой шестью тягами 3 переменной длины. Длина тяг регулируется приводами по командам программы, управляющей движением выходного звена относительно неподвижного основания. Тяги связывают неподвижное основание и выходное звено посредством шарниров.

В одном  $\ell$ -координатном исполнительном устройстве реализуется три (плоский случай) и шесть (пространственный) степеней подвижности. При

Рис. 1.  $l$ -координатное исполнительное устройство

их последовательном соединении число степеней подвижности определяется по формулам:

для плоского случая

$$W = K(3n - 2p_1 - p_2);$$

для пространственного случая

$$W = K(6n - 5p_1 - 4p_2 - 3p_3 - 2p_4 - p_5),$$

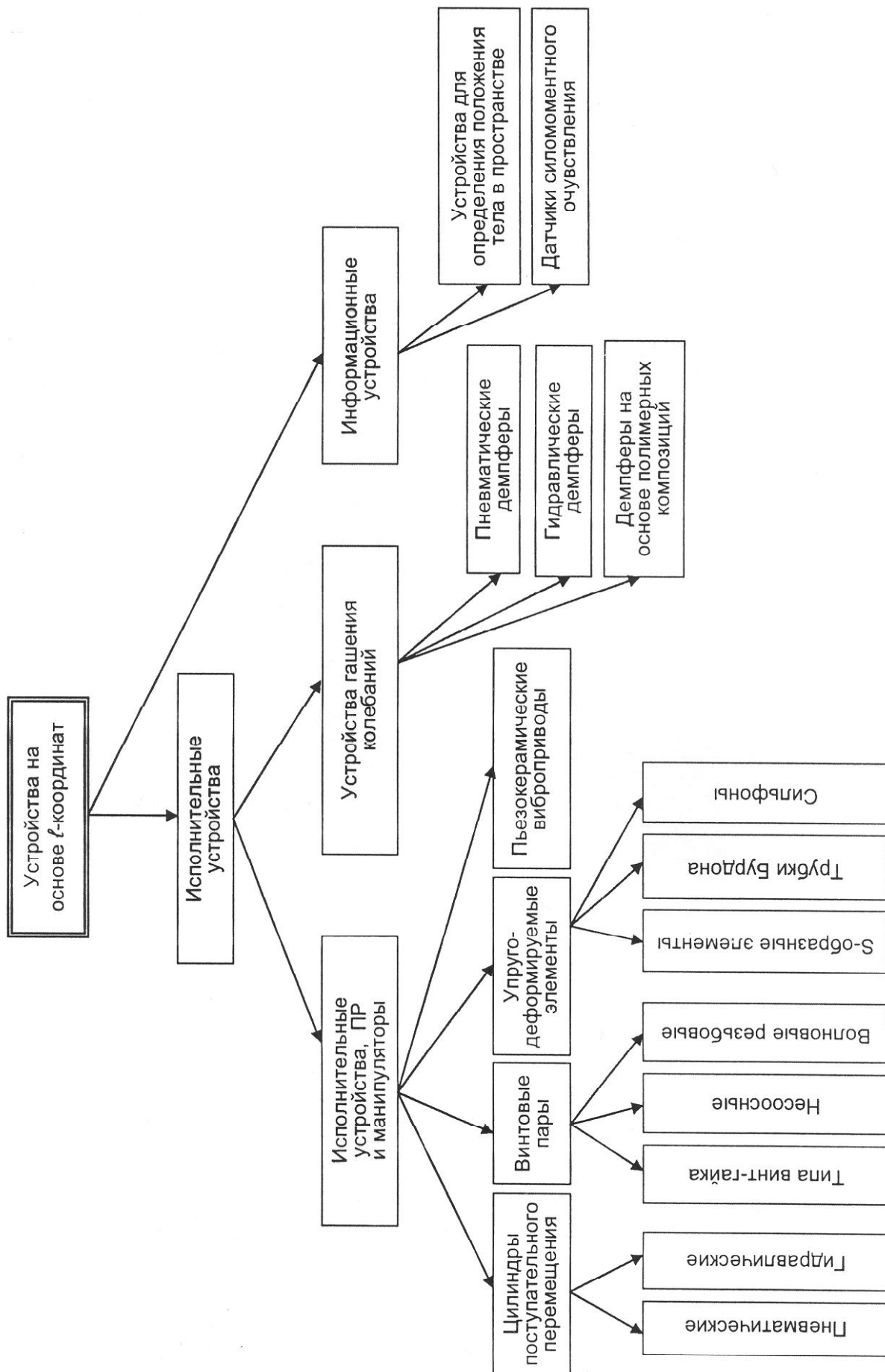
где  $n$  – число подвижных звеньев кинематической цепи;  $K$  – число  $l$ -координатных модулей;  $p_1, p_2, \dots, p_5$  – число пар соответствующего класса с одной, двумя, ..., пятью степенями подвижности.

Устройства на основе  $l$ -координат используются в качестве исполнительных и информационных (табл. 1). Как исполнительные они используются в промышленных роботах (ПР), грузозачно-транспортных устройствах и устройствах гашения

Т а б л и ц а 1

Области использования  $l$ -координатных исполнительных устройств в оборудовании электронной техники

Виды оборудования	Назначение			
	ИУ для сложных перемещений.	Прецизионно манипуляционные системы.	Транспортные системы	Виброзащитные системы
Оборудование субмикронной литографии		■		■
Оборудование выращивания монокристаллов				■
Оборудование вакуумно-плазменного травления	■			
Оборудование для осаждения плёнок термическим испарением в вакууме	■	■	■	
Оборудование катодного распыления	■	■	■	
Оборудование магнетронного распыления	■	■		
Оборудование ионно-плазменного травления	■		■	
Оборудование молекулярно-лучевой эпитаксии	■	■	■	
Оборудование ионно-лучевой эпитаксии	■	■	■	
Оборудование электронно-лучевого испарения	■	■	■	■
Оборудование ОЖЕ-спектрального послойного анализа		■	■	
Шлюзовые устройства и системы вакуумного оборудования		■		
Оборудование зондового контроля	■	■	■	■

Рис. 2. Области применения  $l$ -координатных исполнительных устройств

колебаний [2, 3]. При этом в качестве привода используется любой из известных до настоящего времени приводов — пневмо- или гидропривод, электромеханический, магнитоstrictionный или на основе пьезоэффекта (рис. 2).

Как информационные они используются в качестве датчиков силомоментного очувствления (тензометрические, струнные и т. д.), устройств для определения положения и перемещения тела в пространстве, в которых параметры  $\ell_i$  определяются контактным или бесконтактным методами, например, ультразвуком.

Основные преимущества  $\ell$ -координатных исполнительных устройств по сравнению с известными следующие: математическое описание положения и перемещения тела (выходного звена) только с помощью линейных величин; возможность построения исполнительных и информационных устройств на едином принципе  $\ell$ -координат; идентификация приводов; возможность использования всех известных способов передачи движения в вакуумный технологический объём без узлов трения; повышенная жёсткость; высокая точность.

Во многих случаях в практических расчётах представляет интерес определение соответствующих длин отрезков ( $\ell$ -координат)  $\ell_1, \ell_2, \dots, \ell_6$  в зависимости от положения тела (выходного звена).

Положение тела  $P$  относительно неподвижного основания в декартовых координатах определяется для каждой структуры отдельно.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть дана некоторая структура (рис. 3).

Положение основания определяется тремя точками  $A \{0, a, 0\}$ ,  $O \{0, 0, 0\}$ ,  $B \{\theta, 0, 0\}$ , а тела — точками  $A' \{X_A, Y_A, Z_A\}$ ,  $O' \{X_0, Y_0, Z_0\}$ ,  $B' \{X_B, Y_B, Z_B\}$ , причём  $AA' = \ell_1$ ,  $OA' = \ell_2$ ,  $A'B = \ell_3$ ,  $OO' = \ell_4$ ,  $O'B = \ell_5$ ,  $OB' = \ell_6$ .

Система уравнений для определения  $X_A, Y_A, Z_A, X_B, Y_B, Z_B, X_0, Y_0, Z_0$  имеет вид:

$$\ell_1 = \sqrt{X_A^2 + (Y_A - a)^2 + Z_A^2},$$

$$\ell_2 = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2},$$

$$\ell_3 = \sqrt{(X_A - \theta)^2 + Y_A^2 + Z_A^2},$$

$$\ell_4 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2},$$

$$\ell_5 = \sqrt{(X_0 - \theta)^2 + Y_0^2 + Z_0^2},$$

$$\ell_6 = \sqrt{(X_B - \theta)^2 + Y_B^2 + Z_B^2},$$

$$a = \sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2},$$

$$b = \sqrt{(X_B - X_0)^2 + (Y_B - Y_0)^2 + (Z_B - Z_0)^2},$$

$$c = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}.$$

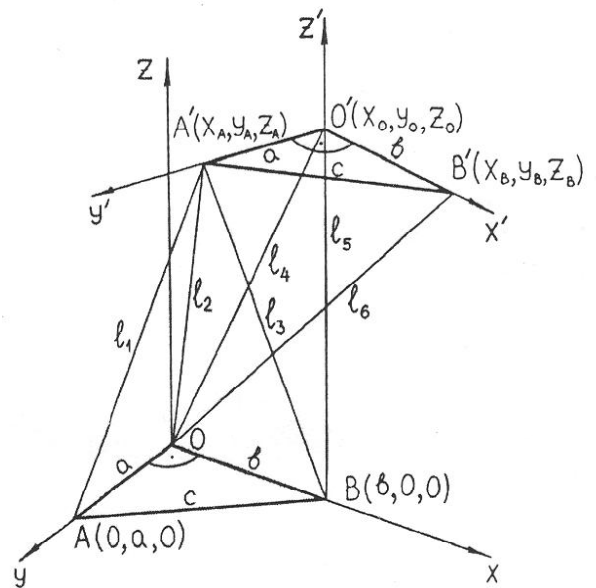


Рис. 3. К решению задачи положения

Не вдаваясь в подробности решения системы уравнений, покажем лишь последовательность действий:

1-й этап. Решаем систему:

$$\begin{cases} \ell_1 = \sqrt{X_A^2 + (Y_A - a)^2 + Z_A^2}, \\ \ell_2 = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}, \\ \ell_3 = \sqrt{(X_A - \theta)^2 + Y_A^2 + Z_A^2}, \end{cases}$$

находим  $X_A, Y_A, Z_A$ .

2-й этап. Решаем систему:

$$\begin{cases} \ell_4 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}, \\ \ell_5 = \sqrt{(X_0 - \theta)^2 + Y_0^2 + Z_0^2}, \\ a = \sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2}, \end{cases}$$

находим  $X_0, Y_0, Z_0$ .

3-й этап. Решаем систему:

$$\begin{cases} \ell_6 = \sqrt{(X_B - \theta)^2 + Y_B^2 + Z_B^2}, \\ b = \sqrt{(X_B - X_0)^2 + (Y_B - Y_0)^2 + (Z_B - Z_0)^2}, \\ c = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}, \end{cases}$$

находим  $X_B, Y_B, Z_B$ .

Таким образом, система (1) полностью решена.

Углы  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$  между координатными осями  $OX$  и  $O'X'$ ,  $OY$  и  $O'Y'$ ,  $OZ$  и  $O'Z'$  находят по правилам векторной алгебры как углы между соответствующими векторами  $OA$  и  $OA'$ ,  $OB$  и  $OB'$ ,  $OD$  и  $OD'$ .

Так, например, угол  $\varphi$  находится из перемножения векторов  $OA$  и  $OA'$ :

$$OA = \{0, a, 0\},$$

$$OA' = \{X_A - X_0; Y_A - Y_0; Z_A - Z_0\},$$

$$OA \cdot OA' = |OA| \cdot |OA'| \cos \varphi,$$

$$a(Y_A - Y_0) =$$

$$= \sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2} a \cdot \cos \varphi.$$

Откуда  $\varphi = \arccos \times$

$$\times \frac{Y_A - Y_0}{\sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2}}.$$

Угол  $\psi$  находится из перемножения векторов  $OB$  и  $OB'$ :

$$OB' = \{X_B - X_0; Y_B - Y_0; Z_B - Z_0\},$$

$$OB = \{b, 0, 0\},$$

$$OB' \cdot OB = |OB'| \cdot |OB| \cos \psi,$$

$$b(X_B - X_0) =$$

$$= \sqrt{(X_B - X_0)^2 + (Y_B - Y_0)^2 + (Z_B - Z_0)^2} b \cdot \cos \psi,$$

$\psi = \arccos \times$

$$\times \frac{X_B - X_0}{\sqrt{(X_B - X_0)^2 + (Y_B - Y_0)^2 + (Z_B - Z_0)^2}}.$$

Угол  $\theta$  находится из перемножения векторов  $OD$  и  $OD'$ :

$$OD = |OA| \cdot |OB| \sin 90^\circ,$$

$$OD' = |OA'| \cdot |OB'| \sin 90^\circ,$$

$$OD' \cdot OD = |OA'| \cdot |OB'| \cdot |OA| \cdot |OB| \cos \theta,$$

$$OA' = \{X_A - X_0; Y_A - Y_0; Z_A - Z_0\},$$

$$OB' = \{X_B - X_0; Y_B - Y_0; Z_B - Z_0\},$$

$$OA = \{0; a; 0\}, |OA| = a,$$

$$OB = \{b; 0; 0\}, |OB| = b,$$

$$OD = |OA| \cdot |OB| \sin 90^\circ,$$

$$OD' = (X_A - X_0)(X_B - X_0) + (Y_A - Y_0)(Y_B - Y_0) +$$

$$+ (Z_A - Z_0)(Z_B - Z_0),$$

$$OD \cdot OD' = |OA'| \cdot |OB'| \cdot |OA| \cdot |OB| \cos \theta,$$

$$ab[(X_A - X_0)(X_B - X_0) + (Y_A - Y_0)(Y_B - Y_0) +$$

$$+ (Z_A - Z_0)(Z_B - Z_0)] =$$

$$= \sqrt{(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2} \times$$

$$\times \sqrt{(X_B - X_0)^2 + (Y_B - Y_0)^2 + (Z_B - Z_0)^2} \cdot ab \cos \theta,$$

где  $\theta = \arccos \{ [(Y_A - Y_0)(Z_B - Z_0) - (Z_A - Z_0) \times$

$$\times (X_B - X_0)]^2 + [(Z_A - Z_0)(X_B - X_0) - (X_A - X_0) \times$$

$$\times (Z_B - Z_0)]^2 + [(X_A - X_0)(Y_B - Y_0) - (Y_A - Y_0) \times$$

$$\times (X_B - X_0)]^2 / \{ [(X_A - X_0)^2 + (Y_A - Y_0)^2 + (Z_A - Z_0)^2] \times$$

$$\times [(X_B - X_0)^2 + (Y_B - Y_0)^2 + (Z_B - Z_0)^2] \}^{1/2}.$$

Полученные соотношения позволяют производить переход от  $\ell$ -координат к обычным декартовым координатам, открывают возможности к решению задач динамики и управления такими устройствами.

Основными параметрами работоспособности исполнительного устройства (рис. 4) и его элементов являются быстрдействие  $B$ , виброустойчивость  $V$ , точность  $T$ , трение износа и газовыделение  $\Gamma$ , которые определяются временем срабатывания  $t$ , амплитудой  $A$ , погрешностью позиционирования  $\Delta$ , коэффициентом трения  $f$ , интенсивностью изнашивания  $J_h$  и газовым потоком  $q$ , которые связаны с процессом выхода годных  $F$  и производительностью оборудования в целом  $Q$ .

Структурная модель сложных процессов в исполнительной системе, состоящей из  $N$  исполнительных устройств, каждое из которых обладает определенной совокупностью внутренних свойств  $F_G$  на каждое действие совокупность внешних возмущений  $U_j$ , входящих параметров  $R_i$  и выходных  $X_k$  имеет вид (рис. 5).

Исходя из запаса работоспособности по быстрдействию  $K_t$ , виброустойчивости  $K_A$ , точности  $K_p$ , трению  $K_f$ , износу  $K_J$ , газовыделению  $K_q$ , суммарный запас работоспособности  $K_\Sigma$  равен:

$$K_\Sigma = \frac{1}{\sum_{i=1}^6 \frac{a_i}{K_i}},$$

где  $a_i$  – весовые коэффициенты по каждому параметру;  $K_i$  – соответствующий запас работоспособности по каждому параметру:  $K_t = \frac{t_p}{t}$ ;  $K_A = \frac{A_p}{A}$ ;

$$K_\Delta = \frac{\Delta_p}{\Delta}; K_f = \frac{f_p}{f}; K_J = \frac{J_p}{J}; K_q = \frac{q_p}{q};$$

Здесь  $t_p, A_p, \Delta_p, J_p, q_{pi}$  – допустимые значения времени срабатывания, амплитуды колебаний, погрешности, коэффициента трения, изнашивания и газового потока в исполнительном устройстве;  $T, A, \Delta, f, J, q$  – фактические значения указанных выше величин.

Наиболее существенные параметры работоспособности исполнительных устройств для различного оборудования ЭТ представлены в табл. 2.

Работоспособность всего исполнительного устройства будет сохраняться до  $K_\Sigma = 1$ .

Исполнительные устройства на основе координат по всем параметрам работоспособности: быстрдействию, виброустойчивости, точности, характеристикам газовыделения, трения и изно-

са, превосходят аналогичные конструкции, построенные на классических координатных системах, что отражено в табл. 3, 4.

Рассмотрим примеры применения  $\ell$ -координатных устройств для конкретного оборудования электронной техники (табл. 4).

**Оборудование для выращивания монокристаллов.** Наряду с высокой точностью поддержания выбранных скоростей перемещения деталей установки, отсутствием загрязнений расплава и выращиваемого монокристалла, стабильностью тепловых условий, основным требованием является отсутствие вибраций, которое достигается за счет применения специальных шестистепенных виброгасителей на основе  $\ell$ -координат. В результате повышается процент выхода годных изделий.

**Оборудование вакуумно-плазменного травления.** Вакуумно-плазменное травление предназначено

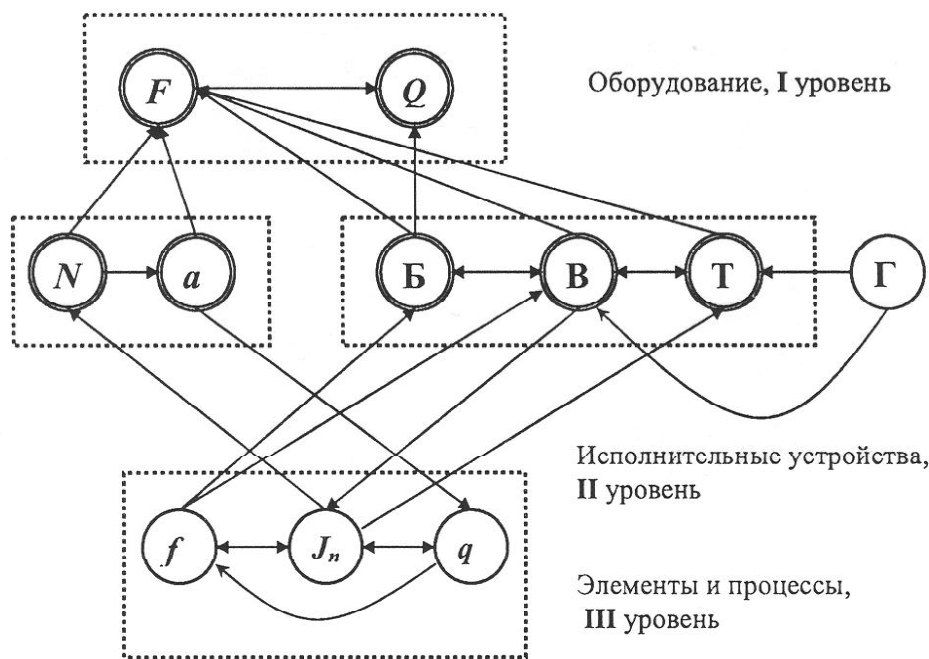


Рис. 4. Структурная схема взаимосвязи основных параметров исполнительного устройства и его элементов с параметрами оборудования:

$N$  – количество элементов;  $a$  – параметры генерируемых микрочастиц износа

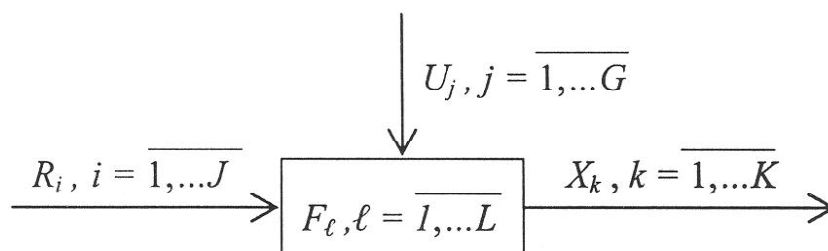


Рис. 5. Структурная модель сложных процессов в исполнительном устройстве

Таблица 2

Наиболее существенные параметры работоспособности  $\ell$ -координатных исполнительных устройств для различного оборудования электронной техники

Виды оборудования	Параметры					
	Быстродействие	Виброустойчивость	Точность	Трение	Износ	Газовыделение
Оборудование субмикронной литографии						
Оборудование выращивания монокристаллов						
Оборудование вакуумно-плазменного травления						
Оборудование для осаждения плёнок термическим испарением в вакууме						
Оборудование катодного распыления						
Оборудование магнетронного распыления						
Оборудование ионно-плазменного травления						
Оборудование молекулярно-лучевой эпитаксии						
Оборудование ионно-лучевой эпитаксии						
Оборудование электронно-лучевого испарения						
Оборудование ОЖЕ-спектрального послыонного анализа						
Шлюзовые устройства и системы вакуумного оборудования						
Оборудование зондового контроля						

для обработки многослойных плёнок с несовместимыми в условиях химической очистки свойствами слоёв. Для повышения качества поверхности столик с подложками должен иметь шесть степеней подвижности, что может быть обеспечено за счёт использования  $\ell$ -координатных устройств с электромеханическим приводом.

**Оборудование для зондового контроля.** Структура установок зондового контроля представляет собой комплекс двух устройств: электромеханического и электронного. Электромеханическое устройство содержит координатную систему, на которой размещается поворотный столик для ориентации закреплённой на нём полупроводниковой пластины с механизмом вертикального перемещения для контакта с зондами. Применение в этих условиях  $\ell$ -координатных устройств однозначно.

Особое внимание уделяется виброзащите оборудования в целом. В случае наличия вибраций возможно разрушение плёнки при контакте с зондом, совершающим колебательное касательное движение. Когда усилие воздействия зонда на контактную площадку велико, возникает «прокол». Наиболее эффективна в этом случае виброзащита по всем шести степеням подвижности на основе  $\ell$ -координат.

**Оборудование для осаждения пленок термическим испарением в вакууме.** К вакуумному оборудованию для осаждения пленок предъявляют следующие требования: высокая скорость откачки газов из рабочей камеры, высокая скорость испарения веществ и возможность регулирования её в широких пределах за счёт изменения подводимой к испарителю мощности, высокая производительность при групповой загрузке и обработке

Таблица 3

**Основные характеристики  $\ell$ -координатных исполнительных устройств и их применение  
в оборудовании электронной техники**

Основные параметры	Назначение			
	Пневматические	Электро-механические	Пьезо-электрические	Магнито-стрикционные
Быстродействие, с	0,01–0,1	0,05–0,3	0,001–0,01	0,001–0,01
Диапазон частот собственных колебаний, Гц	5–20	20–200	200–2000	200–2000
Погрешность позиционирования, мкм	5–100	0,5–10	0,005–1	0,01–2
Количество узлов трения в вакууме	6	–	–	–
Ход исполнительного устройства, мм	100–200, 1–5	50–150	1–5	1–3
Масса устройства (без системы управления), кг	3–10	5–15	0,1–0,5	0,2–0,7
Назначение	Устройства перемещения; виброзащитные системы	Устройства перемещения	Прецизионные манипуляционные системы	Прецизионные манипуляционные системы
Габариты размеры, мм	100×150×100	100×150×150	20×50×70	50×70×90
Области применения в электронной технике	Оборудование вы-ращивания моно-кристаллов; фотолитография; оборудование зон-дового контроля; ОЖЕ-спектральный анализ	МЛЭ; Вакуумно-плазмен-ное травление; ионнолучевая обра-ботка; установки ионно-плазменного трав-ления; ОЖЕ-спектральный анализ	Установки элек-тронной и рентге-нолитографии; МЛЭ; оборудование зон-дового контроля	Установки элек-тронной и рентге-нолитографии; оборудование зон-дового контроля

подложек, возможность одновременно с осаждением пленки получать требуемую конфигурацию тонкоплёночных элементов пассивной части интегральных микросхем, возможность вести процесс как в высоком вакууме, так и в окислительной или восстановительной среде разряженного газа. Применение внутрикамерного  $\ell$ -координатного устройства снижает до минимума узлы трения в вакууме, повышает равномерность покрытия, улучшает чистоту напыляемого слоя. Узлы трения в вакууме могут быть полностью устранены, если в качестве приводных элементов использовать упругодеформированные трубчатые элементы.

**Оборудование для катодного распыления.** Катодное распыление, по сравнению с термическим, имеет определённые преимущества: большая площадь поверхности распыления, возмож-


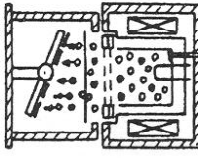
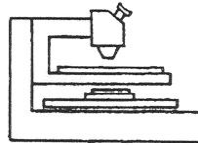
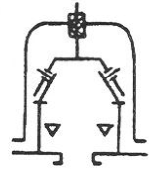
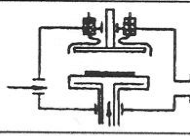
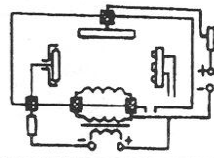
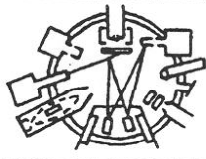
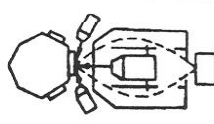
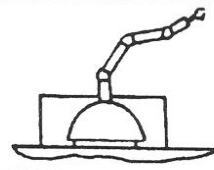
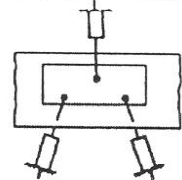
ность распыления тугоплавких металлов и сплавов без изменения состава, отсутствие разогретых деталей в вакуумной камере, возможность точной регулировки толщины плёнки путём изменения величины напряжения на электродах, возможность изготовления многослойных плёнок. Эффективность этого метода распыления можно ещё больше повысить, если внутрикамерное устройство выполнить по одной из структур  $\ell$ -координат, при этом равномерность покрытия за счёт сложного движения подложкодержателя повышается.

**Оборудование для ионно-плазменного напыления.** Ионно-плазменное напыление проводят при давлении  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  Па, что на порядок меньше, чем при катодном распылении. Это обеспечивает более чистые условия осаждения пленок за счет увеличения концентрации электронов с термо-



Таблица 4

Примеры использования и функциональное назначение  $\ell$ -координатных исполнительных устройств

Примеры использования	Функциональное назначение	Среда	Схема	Достижимый результат
Оборудование для выращивания монокристаллов	Виброзащита	Атмосфера		Повышение процента выхода годных изделий
Оборудование вакуумно-плазменного травления	Перемещение подложкодержателя по заданному закону движения	Вакуум и инертный газ		Повышение качества поверхности
Оборудование для зондового контроля	Виброзащита. Совмещение координатной и поворотной систем	Атмосфера		Снижение брака
Оборудование для осаждения пленок термическим испарением в вакууме	Внутрикамерное исполнительное устройство	Вакуум		Повышение равномерности покрытия
Оборудование для катодного распыления	Внутрикамерное исполнительное устройство	Вакуум		Повышение равномерности покрытия
Оборудование для ионно-плазменного напыления	Перемещение подложкодержателя по заданному закону движения	Вакуум		Создание покрытия с заданным законом распределения толщины
Оборудование молекулярно-лучевой эпитаксии	Перемещение подложкодержателя по заданному закону движения	Вакуум		Повышение процента выхода годных изделий
Оборудование ОЖЕ-спектрального послыонного анализа	Виброзащита	Атмосфера		Повышение достоверности воспроизведения спектра
Многостепенные промышленные роботы и манипуляторы	Перемещение объекта с преодолением препятствия	Атмосфера, вакуум		Повышение кинематических возможностей
Гибкие производственные системы микроэлектроники	Информационно-измерительные устройства	Атмосфера		Определение текущих положений подвижных объектов

эмиссионного катода, что приводит к увеличению концентрации ионизированных атомов рабочего газа. С помощью магнитной системы происходит фокусировка и локализация плазмы вблизи мишени,  $\ell$ -координатное исполнительное устройство в данном случае может обеспечивать перемещение подложкодержателя по заданному закону движения и, как результат, создание тонкоплёночного покрытия с заданным законом распределения толщины напыляемого слоя.

**Оборудование молекулярно-лучевой эпитаксии.** Опыт эксплуатации многокамерных установок молекулярно-лучевой эпитаксии показал, что промышленное оборудование должно обеспечивать получение равномерных по толщине структур на диаметре подложки 76–100 мм и более, ультравысокую чистоту в рабочих камерах, более высокую производительность, расширение технологических возможностей установок, высокий уровень автоматизации основных и вспомогательных операций. Для улучшения однородности плёнки могут быть использованы методы перераспределения вещества, попадающего на подложку с помощью неподвижной или вращающейся диафрагмы или за счёт вращения подложки. Применение диафрагмы уменьшает процент использования рабочего вещества источника, а вращение подложки усложняет конструкцию устройства нагрева, поэтому наиболее целесообразно движение подложки по сложной траектории с тремя или шестью степенями подвижности, чему наиболее полно удовлетворяют исполнительные устройства на основе плоских и пространственных  $\ell$ -координат.

**Оборудование оже-спектрального послонного анализа.** Метод электронной оже-спектроскопии (ЭОС) используется для химического анализа поверхности объекта в точке. С помощью растровой ЭОС возможно определение пространственного распределения химических элементов на поверхности, а при послонном анализе – трехмерного распределения элементов. Для получения высокой разрешающей способности необходима полная виброизоляция оборудования от пола, а также отдельных устройств от оборудования.

Для решения этой проблемы наиболее целесообразный подход – использование специальных многокоординатных демпферов, что может быть решено применением  $\ell$ -координатных устройств гашения колебаний. В результате чего достоверность воспроизводимого спектра повышается.

**Многостепенные промышленные роботы и манипуляторы.** В промышленных роботах и манипуляторах устройства на основе  $\ell$ -координат могут быть использованы в качестве исполнительных и информационных как для плоского, так и для пространственного движения. Принимая во вни-

мание, что  $\ell$ -координаты одновременно являются и обобщенными координатами, т. е. независимыми, упрощается управление движением ПР, так как обеспечивается непосредственное измерение текущих значений  $\ell$ -координат с учётом влияния деформаций звеньев руки промышленного робота на положение схвата в пространстве.

**Гибкие производственные системы электронной техники.** Здесь  $\ell$ -координатные устройства могут быть использованы для определения положения и перемещения объектов в пространстве.

Перечисленное оборудование не исчерпывает всех возможных областей применения  $\ell$ -координатных устройств.

В заключение следует отметить, что отличительной особенностью современного этапа электронного машиностроения является решение вопросов нахождения рациональных соотношений между возрастающими требованиями к производительности оборудования электронного производства и качеству выпускаемой продукции, которое во многом зависит от используемых в оборудовании исполнительных устройств.

Существенное повышение эксплуатационных характеристик оборудования электронного производства может быть достигнуто за счёт использования устройств на основе  $\ell$ -координат, которые, по сравнению с традиционными исполнительными устройствами, могут одновременно выполнять функции манипуляторов, транспортных устройств, гасителей колебаний и др.

Разработанная система  $\ell$ -координат, являясь сравнительно новым математическим аппаратом, открывает широкие возможности получения позитивных результатов при решении прикладных задач в различных областях науки и технологий, связанных с движением твёрдого тела в пространстве, в том числе в системах гибких автоматизированных и роботизированных производств, виброметрии, навигации, технической диагностики, механизмах для ориентации и перемещения изделий (например, [4]) и др.

#### **Библиографические ссылки**

1. Колисков А.Ш. разработка и исследование промышленных роботов на основе  $\ell$ -координат // Станки и инструмент. 1982. № 12. С. 21–24.
2. Василенко Н.В., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. и др. Расчёт и конструирование механических систем оборудования аэрокосмической и электронной техники: Учеб. пос. для вузов. Томск: МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь», 1999. 304 с.
3. Ивашов Е.Н. Устройства на основе  $\ell$ -координат в оборудовании электронной техники: Учеб. пос. М.: МИЭМ, 1995. 35 с.
4. А.с. 1366389 СССР: МКИ 4 В25 J, 11/00. Механизм для ориентации и перемещения изделий.