



СОЮЗ СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

(19) SU (11) 1815209 A1

(51)5 В 25 J 11/00, 9/16

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПАТЕНТНОЕ
ВЕДОМСТВО СССР
(ГОСПАТЕНТ СССР)

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1

2

(21) 4917891/08
(22) 18.02.91
(46) 15.05.93. Бюл. № 18
(71) Белорусский политехнический институт
(72) И.П.Филонов, Ю.Б.Герасимов, А.А.Черкас и П.В.Курч
(56) Авторское свидетельство СССР № 1318391, кл. В 25 J 9/16, 1987.
(54) СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРОМ ПРОМЫШЛЕННОГО РОБОТА
(57) Использование: в манипуляторах промышленных роботов. Сущность изобретения: в способе управления манипулятором

промышленного робота определяют расчетные (номинальные) законы изменения обобщенных скоростей всех приводных двигателей, а также мощности этих приводных двигателей, получают действительные (измеренные) обобщенные скорости всех приводных двигателей, а также действительные (измеренные) мощности этих приводных двигателей, сравнивают расчетные мощности с действительными (измеренными) и по сигналу рассогласования между ними формируют сигнал управления приводными двигателями. 15 ил.

Изобретение относится к машиностроению и может найти применение в манипуляторах промышленных роботов, в частности для механизации вспомогательных операций процессов сборки, окраски и т.п.

Цель изобретения состоит в повышении точности отработки закона движения схвата и повышение надежности за счет возможности формирования расчетных силовых и скоростных характеристик отдельных приводов с учетом их кинематики, а также с учетом массово-геометрических характеристик всех подвижных звеньев при отработке требуемого закона движения схвата.

Поставленная цель достигается тем, что в манипуляторе предусматривается возможность получения для каждого из приводных двигателей четырех величин в виде напряжения, два из которых изменяются прямопропорционально расчетной (номинальной) мощности P_p и расчетной (номинальной) частоте вращения двигателя ω_p , а вторые два напряжения измеряются прямо-

пропорционально действительной (измеренной) мощности приводного двигателя $P_{мех}$ и действительной (измеренной) частоте вращения данного двигателя $\omega_{мех}$ эти четыре сигнала попарно сравниваются и сигналом их рассогласования производится выравнивание действительных (измеренных) мощности и частоты вращения двигателя относительно расчетных (номинальных) их значений.

На фиг. 1 изображена схема манипулятора с тремя степенями подвижности; на фиг. 2 – схема сил и моментов, действующих на звено 3 манипулятора с деталью 6 (перемещаемым грузом), расположенной в схвате 4; на фиг. 3 и 4 – схемы сил и моментов, действующих на звено 2 и звено 1 соответственно; на фиг. 5 – схема, поясняющая выбранный закон изменения скорости схвата 4 манипулятора; на фиг. 6, 7 и 8 – законы изменения обобщенных скоростей, в соответствии с выбранным законом движения схвата 4 манипулятора вдоль заданной тра-

(19) SU (11) 1815209 A1

ектории; на фиг. 9, 10 и 11 – законы изменения управляющей силы $R^{упр}_{23}$ и управляющих моментов каналов приводных двигателей (звена 2 манипулятора $M^{упр}_{12}$, звена 1 $M^{упр}_{01}$, обеспечивающих относительные движения соответствующих подвижных звеньев в соответствии с выбранной траекторией схвата 4 и закона изменения его скорости; на фиг. 12, 13 и 14 – расчетные (номинальные) законы изменения мощностей трех приводных двигателей с учетом постоянных потерь (кривые 2); на фиг. 15 – блок-схема системы управления по мощности.

Манипулятор содержит подвижные звенья 1, 2 и 3, схват 4, установленный неподвижно на звене 3, станину 5, а также перемещаемую деталь 6.

Как известно, перемещение объекта в пространстве может быть реализовано тремя обобщенными координатами. В качестве обобщенных координат выбирают угловые или линейные перемещения звеньев. В любом сочетании вращательных и поступательных кинематических пар может быть реализовано перемещение тела в пространстве. Оно может быть реализовано и при наличии только 3-х поступательных или 3-х вращательных. Таким образом, если рассмотреть манипулятор со степенями подвижности >3 , например 5, то выбирают 3 основные (любые, как указано выше), остальные (в данном случае 2) "замораживают" или используют для ориентации тела в пространстве или других целей.

Неподвижная система координат $X_0Y_0Z_0$ с началом в точке O , совпадающей с центром вращения кинематической пары, образованной звеном 1 со станиной 5, подвижная система координат $X_1Y_1Z_1$ связана со звеном 1 таким образом, что начало ее (точка O_1) совпадает с точкой O , а ось Z_1 направлена вдоль звена 1, система координат $X_2Y_2Z_2$ выбрана таким образом, что ее начало (точка O_2) совпадает с центром вращения кинематической пары B , образованной звеном 2 со звеном 1, а ось Z_2 направлена вдоль направляющих звена 2, в которых движется звено 3 поступательно, так что оси Z_2 и Z_3 совпадают, а начало (точка O_3) системы координат $X_3Y_3Z_3$ движется вдоль оси Z_2 , таким образом, манипулятор (фиг. 1) имеет возможность реализовать движение схвата 4 в пространстве с помощью трех обобщенных координат α_{10} – угла поворота звена 1 относительно станины 5, $\alpha_{31} = \alpha_{21}$ – угла поворота звена 2 относительно звена 1 и S_{32} – перемещение звена 3 в направляющих звена 2. На фиг. 1 изображена также траектория точки D дета-

ли 6, например, центры масс детали, установленной в схвате 4 неподвижно.

Движение точки D вдоль выбранной траектории задается координатами X_D, Y_D, Z_D , а также радиусом-вектором \vec{r}_D и его углами поворота прецессии Ψ_D и нутации Θ_D .

В основу функциональной взаимосвязи обобщенных координат с координатами точки D траектории схвата 4 положено представление вектора $\vec{r}_D = X_D \vec{i} + Y_D \vec{j} + Z_D \vec{k}$ в неподвижной системе координат с помощью углов (см. фиг. 1).

$$\left. \begin{aligned} \Psi_D &= \arctg(Y_D/X_D) \\ \Theta_D &= \arctg(Z_D/\sqrt{X_D^2+Y_D^2}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Как видно из фиг. 1 обобщенные координаты $\alpha_{10}, S_{32}, \alpha_{31}$ могут быть определены из условия $\vec{r}_D = \vec{l}_1 + \vec{l}_{BD}$ замкнутости векторного контура, которое выполняется в каждой точке D траектории схвата 4. После некоторых преобразований получают следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_{10} &= \frac{\pi}{2} - \dot{\Psi}_D = \frac{\pi}{2} - \arctg(Y_D/X_D) \\ S_{32} &= l_{BD} = \sqrt{r_D^2 + l_1^2 - 2r_D l_1 \sin \Theta_D} \\ \alpha_{31} &= \alpha_{21} = \pi - \arccos \frac{l_1^2 + l_{BD}^2 - r_D^2}{2l_1 l_{BD}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $r_D = \sqrt{X_D^2 + Y_D^2 + Z_D^2}$ – длина звена 1 манипулятора.

Каждому закону изменения скорости точки D $\dot{V}_D = \dot{X}_D \vec{i} + \dot{Y}_D \vec{j} + \dot{Z}_D \vec{k}$ вдоль ее траектории соответствует свой закон изменения углов Ψ_D и Θ_D во времени, т.е.

$$\left. \begin{aligned} \dot{\Psi}_D &= \frac{\dot{Y}_D X_D - \dot{X}_D Y_D}{X_D^2 + Y_D^2} \\ \dot{\Theta}_D &= \frac{Z_D(\dot{X}_D^2 + \dot{Y}_D^2) - \dot{Z}_D(X_D \dot{X}_D + Y_D \dot{Y}_D)}{(X_D^2 + Y_D^2 + Z_D \sqrt{X_D^2 + Y_D^2})} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Обобщенные скорости могут быть получены дифференцированием уравнений (2) по времени. После преобразований получают

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha}_{10} &= -\dot{\Psi}_D = \frac{\dot{X}_D Y_D - \dot{Y}_D X_D}{X_D^2 + Y_D^2} \\ \dot{S}_{32} \cdot l_{BD} &= \frac{r_D \dot{r}_D - l_1 (r_D \sin \Theta_D + \dot{r}_D \cos \Theta_D)}{\sqrt{r_D^2 + l_1^2 - 2r_D l_1 \sin \Theta_D}} \\ \dot{\alpha}_{31} = \dot{\alpha}_{21} &= \frac{2l_{BD} (l_{BD} \dot{\Theta}_D - r_D \dot{r}_D) - \dot{Z}_D (l_1^2 + l_{BD}^2 - r_D^2)}{l_{BD} \sqrt{4l_1^2 l_{BD}^2 - (l_1^2 + l_{BD}^2 - r_D^2)}} \end{aligned} \right\}$$

$$\text{где } \dot{r}_D = \frac{X_D \dot{X}_D + Y_D \dot{Y}_D + Z_D \dot{Z}_D}{\sqrt{X_D^2 + Y_D^2 + Z_D^2}}$$

Используя связь производной обобщенной координаты по времени с производной по параметру S , обобщенные ускорения представляют в виде

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\alpha}_{10} &= \frac{a_D}{V_D} \dot{\alpha}_{10} + V_D \frac{d\dot{\phi}_{10}}{dS}, \\ \ddot{\alpha}_{31} &= \frac{a_D}{V_D} \dot{\alpha}_{31} + V_D \frac{d\dot{\phi}_{31}}{dS}, \\ \ddot{S}_{32} &= \frac{a_D}{V_D} \dot{S}_{32} + V_D \frac{d\dot{S}_{32}}{dS} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $a_D = \frac{dV_D}{dt}$ ускорение точки D ;

dS – приращение пути (перемещения) точки D вдоль траектории.

Таким образом, исходными данными для определения реактивных силы и моментов в подвижных звеньях манипулятора являются скорость V_D и ускорение a_D точки D центра масс детали 6 при перемещении по заданной траектории, а также его массовые и геометрические характеристики. Это позволяет положить в основу силового анализа метод кинестатики. Равенство нулю главного вектора сил, действующих на звено 3 манипулятора (см. фиг. 2) даёт следующие уравнения равновесия в неподвижной системе координат:

$$\bar{R}^{(o)}_{23} + \bar{F}^{(o)}_{из3} + \bar{G}^{(o)}_3 + \bar{F}^{(o)}_{иD} + \bar{G}^{(o)}_D = 0 \quad (6)$$

где $\bar{R}^{(o)}_{23}$ – сила реакции в соединении звена 3 со звеном 2 ;

$\bar{F}^{(o)}_{из3}$ – сила инерции звена 3 ;

$\bar{G}^{(o)}_3$ – сила тяжести звена 3 ;

$\bar{F}^{(o)}_{иD}$ – сила инерции детали 6 ;

$\bar{G}^{(o)}_D$ – сила тяжести детали 6 ;

Все компоненты уравнения (6) заданы в неподвижной системе координат $X_0Y_0Z_0$.

Уравнение (6) в координатной форме представляют в виде

$$\begin{bmatrix} R_{23x}^{(o)} \\ R_{23y}^{(o)} \\ R_{23z}^{(o)} \end{bmatrix} = m_3 \begin{bmatrix} \dot{X}_{33}^{(o)} \\ \dot{Y}_{33}^{(o)} \\ \dot{Z}_{33}^{(o)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -G_3 \end{bmatrix} + m_D \begin{bmatrix} \dot{X}_D^{(o)} \\ \dot{Y}_D^{(o)} \\ \dot{Z}_D^{(o)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -G_D \end{bmatrix} \quad (7)$$

где $R^{(o)}_{23x}$, $R^{(o)}_{23y}$, $R^{(o)}_{23z}$ – проекции силы реакции в соединении звена 3 со звеном 2 на оси неподвижной системы координат $X_0Y_0Z_0$;

m_3 – масса звена 3 ;

m_D – масса детали 6 ;

\dot{X}_D , \dot{Y}_D , \dot{Z}_D – проекции вектора ускорения точки D на оси неподвижной системы координат $X_0Y_0Z_0$

$$G_3 = m_3 g; \quad G_D = m_D g,$$

где g – ускорение свободного падения;

S_3 – точка центра масс звена 3 ;

$\bar{X}^{(o)}_{S3}$, $\bar{Y}^{(o)}_{S3}$, $\bar{Z}^{(o)}_{S3}$ – проекции вектора ускорения \bar{a}_{S2} точки на оси неподвижной системы координат $X_0Y_0Z_0$

Все компоненты уравнения (7) в неподвижной системе координат.

Ускорение \bar{a}_{S3} точки S_3 представляют в виде

$$\bar{a}^{(o)}_{S3} = \frac{d^2 r_{S3}^{(o)}}{dt^2} = \bar{a}^{(o)}_{rS} + 2\bar{W}^{(o)}_3 \times \bar{V}^{(o)}_{rS3} +$$

$$+ \bar{W}^{(o)}_3 \times \bar{W}^{(o)}_3 \times \bar{W}^{(o)}_3 \times \bar{r}^{(o)}_{S3} + \bar{\epsilon}^{(o)}_3 \times \bar{r}^{(o)}_{S3}$$

где r_{S3} – радиус-вектор точки S_3 центра масс звена 3 ,

$$\bar{a}^{(o)}_{rS3} = [N_{30}] \cdot \bar{a}^{(3)}_{rS3}$$

$$\bar{a}^{(3)}_{rS3} = \dot{S}^{(3)}_{32} \cdot \bar{K}$$

$$[N_{30}] = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{10} \sin \alpha_{31} & \sin \alpha_{10} & -\cos \alpha_{10} \cos \alpha_{31} \\ \cos \alpha_{10} \cos \alpha_{31} & \cos \alpha_{10} & \sin \alpha_{10} \sin \alpha_{31} \\ \sin \alpha_{31} & 0 & \cos \alpha_{31} \end{bmatrix}$$

матрица преобразования векторов, заданных координатами в системе координат $X_3Y_3Z_3$ в координаты, заданные в неподвижной системе координат $X_0Y_0Z_0$, W_3 – угловая скорость звена 3 , \bar{V}_{rS3} – скорость поступательная точки S_3 , в координатной форме \bar{W}_3 и \bar{V}_{rS3}

$$\begin{bmatrix} W_{3x}^{(o)} \\ W_{3y}^{(o)} \\ W_{3z}^{(o)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{31} \sin \alpha_{10} \\ \alpha_{31} \cos \alpha_{10} \\ \alpha_{10} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} V_{rS3x}^{(o)} \\ V_{rS3y}^{(o)} \\ V_{rS3z}^{(o)} \end{bmatrix} = [N_{30}] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ S_{32}^{(3)} \end{bmatrix}$$

$\bar{\epsilon}^{(o)}_3 = dW^{(o)}_3 / dt$ – угловое ускорение звена 3 .

Реактивный момент \bar{N}_{23} , действующий на звено 3 со стороны звена 2 , в неподвижной системе координат определяют из уравнения

$$\bar{M}^{(o)}_{23} = \bar{M}^{(o)}_{GD} + \bar{M}^{(o)}_{G_{S3}} - \bar{M}^{(o)}_{I_{S3}} - \bar{M}^{(o)}_{I_3} - \bar{M}^{(o)}_{I_D} \quad (8)$$

где $\bar{M}^{(o)}_{GD} = \bar{r}^{(o)}_D \times \bar{G}_D$ – момент силы тяжести детали 6 ;

$\bar{M}^{(o)}_{I_D} = \bar{r}^{(o)}_D \times \bar{F}^{(o)}_{иD}$ – момент силы инерции детали 6 ;

$\bar{M}^{(o)}_{G_{S3}} = \bar{r}^{(o)}_{S3} \times G_3$ – момент силы тяжести G_3 звена 3 ;

$\bar{M}^{(o)}_{I_{S3}} = \bar{r}^{(o)}_{S3} \times \bar{F}^{(o)}_{и3}$ – момент силы инерции $\bar{F}^{(o)}_{и3}$.

$\bar{M}_3^M = [N_{30}] [I_{s3}] \bar{\epsilon}_3 + \bar{W}_3 \times [I_{s3}] \bar{W}_3$ – инерционный момент звена 3 неподвижной системы координат

$[I_{s3}]$ – тензор инерции звена 3 относительно его центра масс S_3 .

Полученные значения проекций реактивных сил и моментов звена 3 по формулам (7) и (8) в неподвижной системе координат $X_0Y_0Z_0$ не дают представления о распределении реактивных сил и моментов в системе координат $X_3Y_3Z_3$, связанной со звеном 3. Поэтому производится преобразование векторов $R_{23}^{(0)}$ и $M_{23}^{(0)}$ вычисленных в неподвижной системе координат $X_0Y_0Z_0$ в систему координат $X_3Y_3Z_3$ следующим образом:

$$\bar{R}_{23}^{(3)} = [N_{03}] \bar{R}_{23}^{(0)}; \quad (9)$$

$$\bar{M}_{23}^{(3)} = [N_{03}] \bar{M}_{23}^{(0)}; \quad (10)$$

где $[N_{03}] = [N_{30}]^T$ – матрица преобразования векторов, заданных координатами в системе координат $X_0Y_0Z_0$ в координаты, заданные в системе координат $X_3Y_3Z_3$.

Преобразование вектора $\bar{R}_{23}^{(0)}$, получаемого из уравнения (7), в проекциях на оси неподвижной системы координат $X_0Y_0Z_0$ в систему координат $X_3Y_3Z_3$ уравнение (9) позволяет выделить его движущую $R_{23}^{AB} = R_{23}^{(3)} Z$ (3) и собственно

реактивную $R_{23}^R = \sqrt{(R_{23x}^{(3)})^2 + (R_{23y}^{(3)})^2}$ составляющие. Определяют законы изменения R_{23}^{AB} и R_{23}^R в функции от пути (длины траектории точки D) посредством решения уравнения (9) в фиксированных точках траектории. Аналогично, решая уравнение (10), в фиксированных точках траектории точки, выделяют реактивные составляющие $M_{23x}^{(3)}$, $M_{23y}^{(3)}$, $M_{23z}^{(3)}$ и получают закон изменения собственно реактивной составляющей в функции от пути

$$R_{23}^R = \sqrt{(M_{23x}^{(3)})^2 + (M_{23y}^{(3)})^2 + (M_{23z}^{(3)})^2}$$

Определение законов изменения движущих и реактивных сил и моментов звена 3 в функции от пути позволяет оценить динамическую нагруженность звена 3 при перемещении схвата 4 вдоль траектории заданной с заданными ускорениями и скоростями.

Определяют закон изменения управляющей силы $R_{23}^{упр} = R_{23}^{AB}$ в функции от пути. Для этого график R_{23}^{AB} , построенный в функции от пути, отражают симметрично относительно оси S. Полученный в результате

отражения график представляет собой управляющую силу звена 3.

Аналогично определяют значения движущихся и реактивных сил и моментов в соединении звеньев 2 и 1, определяют законы их изменения функции от пути. Для звена 2 (см. фиг. 3) уравнения равновесия в векторной форме в неподвижной системе координат представляют в виде

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{12} + \bar{R}_{32} + \bar{G}_2 &= 0 \\ \bar{M}_{12} + \bar{M}_{32} + \bar{M}_{и2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Учитывая, что $\bar{R}_{32} = -\bar{R}_{23}$ и $\bar{M}_{32} = -\bar{M}_{23}$, то (11) записывают в виде

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{12} &= \bar{R}_{23} - \bar{G}_2 \\ \bar{M}_{12} &= \bar{M}_{23} - \bar{M}_{и2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где \bar{R}_{12} – сила реакции в соединении звена 2 со звеном 1;

\bar{R}_{23} – находят из уравнения (7);

\bar{G}_2 – сила тяжести звена 2;

\bar{M}_{12} – момент, действующий на звено 2 со стороны звена 1;

\bar{M}_{23} – момент, действующий на звено 3 со стороны звена 2, ходят из уравнения (8);

$\bar{M}_{и2}$ – момент силы инерции звена 2.

$$\bar{M}_{и2} = [N_{20}] [I_{s2}] \bar{\epsilon}_3 + \bar{W}_3 \times [I_{s2}] \bar{W}_3 \quad (13)$$

$[I_{s2}]$ – тензор инерции звена 2 относительно его центра масс S_2 .

Векторы \bar{R}_{12} и \bar{M}_{12} , вычисленные по формулам (12) в неподвижной системе координат $X_0Y_0Z_0$, преобразовывают в систему координат $X_2Y_2Z_2$ следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{12}^{(2)} &= [N_{02}] \bar{R}_{12}^{(0)} \\ \bar{M}_{12}^{(2)} &= [M_{02}] \bar{M}_{12}^{(0)} \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где $[N_{02}] = [N_{20}]^T$ – матрица преобразования векторов, заданных координатами в системе координат $X_0Y_0Z_0$ в координаты, заданные в системе координат $X_2Y_2Z_2$.

Выделяют движущую $M_{12}^{AB} = M_{12}^{(2)} X$ и собственно реактивную $M_{12}^R =$

$= \sqrt{(M_{12y}^{(2)})^2 + (M_{12z}^{(2)})^2}$ составляющие момента звена 2. Определяют законы изменения M_{12}^{AB} , M_{12}^R , а также $R_{12}^R =$

$\sqrt{(R_{12x}^{(2)})^2 + (R_{12y}^{(2)})^2 + (R_{12z}^{(2)})^2}$ в функции от пути. Определяют закон изменения управляющего момента $M_{12}^{упр} = M_{12}^{AB}$ в функции от пути. Для этого график M_{12}^{AB} , построенный в функции от пути, отражают симметрично относительно оси S. Полученный в результате отражения график представляет

собой управляющий момент на валу приводного двигателя звена 2.

Для звена 1 (см. фиг. 4) уравнение равновесия в векторной форме представляют в виде

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{01} + \bar{R}_{21} + \bar{G}_1 &= 0 \\ \bar{M}_{01} + \bar{M}_{21} + \bar{M}_{и1} + \bar{M}_A(\bar{R}_{21}) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Так как $\bar{R}_{21} = -\bar{R}_{12}$ и $\bar{M}_{21} = -\bar{M}_{12}$, (14) записывают в виде

$$\left. \begin{aligned} \bar{R}_{01} + \bar{R}_{21} + \bar{G}_1 & \\ \bar{M}_{01} + \bar{M}_{21} + \bar{M}_{и1} + \bar{M}_A(\bar{R}_{21}) & \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где \bar{R}_{01} – сила реакции в соединении звена 1 со станиной 5;

\bar{R}_{12} – сила реакции в соединении звена 2 со станиной 5, находят из уравнения (12);

\bar{G}_1 – сила тяжести звена 1;

\bar{M}_{01} – момент, действующий на звено 1 со стороны станины 5;

\bar{M}_{12} – момент, действующий на звено 2 со стороны звена 1, находят из уравнения (12).

$\bar{M}_{и1}$ – момент силы инерции звена 1

$$\bar{M}_{и1} = [N_{10}] (\dot{I}_{s1} \dot{\Psi}_b + \dot{\Psi}_b \times [I_{s1}] \dot{\Psi}_b)$$

$[I_{s1}]$ – тензор инерции звена 1 относительно центра его масс S_1 .

$\bar{M}_A(\bar{R}_{21}) = \bar{I}_1 \times \bar{R}_{21}$ – момент силы реакции \bar{R}_{21} .

Все компоненты уравнений (14) и (15) заданы в неподвижной системе координат $X_0Y_0Z_0$.

Векторы \bar{R}_{01} и \bar{M}_{01} , вычисленные по формуле (15) в неподвижной системе координат $X_0Y_0Z_0$, преобразовывают в систему координат $X_1Y_1Z_1$ следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} R^{(1)}_{01} &= [N_{01}] \bar{R}^{(0)}_{01} \\ \bar{M}^{(1)}_{01} &= [N_{01}] \bar{M}^{(0)}_{01} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $[N_{01}] = [N_{10}]$ – матрица преобразования векторов, заданных координатами в системе координат $X_0Y_0Z_0$ в координаты, заданные в системе координат $X_1Y_1Z_1$.

Выделяют движущую $M^{ab}_{01} = M^{(1)}_{012}$ и собственно реактивную $M^R_{01} =$

$= \sqrt{(M^{(1)}_{01x})^2 + (M^{(1)}_{01y})^2}$ составляющие моменты звена 1.

Определяют законы изменения M^{ab}_{01} ,

M^R_{01} , а также $R^R_{01} = \sqrt{(R^{(1)}_{01x})^2 + (R^{(1)}_{01y})^2 + (R^{(1)}_{01z})^2}$ в функции от пути. Определяют закон изменения управляющего момента $M^{упр}_{01} = M^{ab}_{01}$ в функции от пути. Для этого график M^{ab}_{01} постро-

енный в функции от пути, отражают симметрично относительно оси S . Полученный в результате отражения график представляет собой управляющий момент на валу приводного двигателя звена 1.

Еще одним достоинством предложенного способа управления является то, что при расчете силовых и скоростных характеристик отдельных приводов графики изменить расчетных (номинальных) управляющих моментов $M^{упр}_{01}$ и $M^{упр}_{12}$ и расчетной (номинальной) управляющей силы $F^{упр}_{23}$, а также расчетных (номинальных) угловых α_{10} и α_{21} и линейной S_{32} скоростей, мы строим в функции от пути S , а не от времени t . Преимущество заключается в том, что ведя расчеты по S , а не по t , для любого закона изменения скорости схвата вдоль заданной траектории $v=v(S)$ можно легко определить быстродействия по формуле $t = \int_0^T dS/v(S)$ и значительно легче выйти

на закон изменения силы инерции перемещаемого объекта по формуле

$$F_g = -M^g \cdot v \cdot v'$$

где $v' = dv/dS$, а дальше и увязать пройденный путь со временем (логгрешностью позиционирования во времени) с учетом зависимости

$$\Delta t = t_1 + t - t_1 = \frac{S_1 + 1 - S_1}{v_1 + 1 - v_1}$$

и погрешностью по скорости с учетом зависимости

$$\Delta v' = \frac{v_1 + 1 - v_1}{s_1 + 1 - s_1}$$

Закон же изменения силы инерции кладут в основу определения динамической нагрузки приводных двигателей. При этом значения выбранных обобщенных координат, как и обобщенных скоростей определяют также в функции пути S , т.е. в функции траектории центра масс перемещаемого объекта.

Пример. Исходные данные: траектория схвата – прямая линия, проходящая через начальную и конечную точку $D_n \{0,289; 0,498; 0,805\}$, $D_k \{0; 1; 0,65\}$; размеры звеньев манипулятора $l_1=1$ м, $l_{вд}=1,6$ м (размерами звена 2 можно пренебречь); массы звеньев $m_1=17$ кг, $m_2=1,3$ кг, $m_3=15$ кг; масса перемещаемой детали $m_D=5$ кг; начала подвижных систем координат, связанных жестко с подвижными звеньями, расположены на осях их относительного вращения, при этом оси Z этих систем координат направле-

ны вдоль звеньев; координаты центров масс подвижных звеньев расположены в их середине; координаты центра масс детали 6 расположены на линии D_H-D_K ; быстродействие (время отработки траектории D_H-D_K) $T=6$ с; длина траектории $S=0,6$ м; движение схвата вдоль траектории D_H-D_K задано в виде трапецеидального закона (см. фиг. 5) с участком разгона ($t_{разг}=1/4 T$) равномерного движения ($t_{пу}=1/2 T$) и участком торможения ($t_{торм}=1/4 T$), $V_m=0,133$ м/с.

По полученным зависимостям (5), (9), (10), (13), (16), определяющим функциональную взаимосвязь обобщенных координат, а также их скоростей и ускорений с движущими и реактивными силами и моментами, возникающими в подвижных звеньях манипулятора, составлена программа на ЭВМ. По результатам численного исследования рассматриваемого примера с помощью ЭВМ построены графики законов изменения обобщенных скоростей в соответствии с выбранным законом движения схвата вдоль заданной траектории (см. фиг. 6, 7 и 8).

На фиг. 9 представлен график закона изменения управляющей силы $R^{упр}_{23}=R^{об}_{23}$, обеспечивающей относительное движение звена 3 в соответствии с заданной траекторией схвата и закона изменения его скорости. На фиг. 10 и 11 представлены графики законов изменения управляющих моментов на валах приводных двигателей (звена 2 манипулятора $M^{упр}_{12}=M^{об}_{12}$, звена 1 — $M^{упр}_{01}=M^{об}_{01}$) соответственно, обеспечивающие относительные движения соответствующих подвижных звеньев в соответствии с заданной траекторией схвата и закона изменения его скорости. На фиг. 12, 13 и 14 — представлены законы изменения мощностей трех приводных двигателей (кривые 1), а также законы изменения мощностей с учетом постоянных потерь, всегда присутствуют как в приводе, так и в передаточных механизмах (редукторах и т.д.) (кривые 2). На фиг. 15 представлена блок-схема системы управления по мощности, структуру и способ функционирования которой мы рассмотрим более подробно.

Блок-схема системы управления по мощности одного из приводных двигателей, например, приводящего во вращение звено 1 (см. фиг. 2), представлена на фиг. 15. Данная схема содержит главный контур управления, состоящий из программируемого функционального генератора 1, электрически связанного с катушкой 2 электромагнита, имеющего сердечник 3 и подвижный общий якорь 4, который жестко соединен с

планкой 5, изготовленной из магнитомягкого материала, которая перекрывает часть воздушного зазора магнитопровода в магнитной цепи, содержащей катушку 7, включенную последовательно в электрическую цепь обмотки управления 8, двухфазного асинхронного двигателя переменного тока 9, имеющего к тому же обмотку возбуждения 10, на валу приводного двигателя 9 размещен тахогенератор 11, электрически соединенный через реостат 12 с блоком перемножения аналоговых величин 13, а на выходном звене редуктора электродвигателя 9 размещен тензодатчик 14, электрически соединенный с усилителем 15, который также электрически соединен через реостат 16 с блоком перемножения 13. Если относительное движение звена соответствующего приводного двигателя является возвратно-поступательным, тензодатчик 14 может быть заменен соответственно датчиком, вырабатывающим электрический ток, прямопропорциональный движущей силе, приложенной к этому звену, перемножитель 13 электрически соединен с катушкой 17 электромагнита, имеющего сердечник 18 и общий подвижный якорь 4, вспомогательный контур управления состоит из программируемого функционального генератора 19, электрически связанного с катушкой 20 электромагнита, имеющего сердечник 21 и общий подвижный якорь 22, который жестко соединен с планкой 23, изготовленной из магнитомягкого материала, которая перекрывает часть воздушного зазора магнитопровода 24 магнитной цепи, содержащей катушку 25, включенную последовательно в электрическую цепь обмотки управления 8 двухфазного асинхронного двигателя 9, тахогенератор 11 через реостат 12 электрически связан с катушкой 26 электромагнита, имеющего сердечник 27 и общий подвижный якорь 22, устройство управления двигателем 28 электрически связано с обмоткой управления 8.

Принцип работы блок-схемы системы управления по мощности состоит в следующем.

В соответствии с необходимым законом движения схвата вдоль заданной траектории программируемый функциональный генератор 1 формирует электрический сигнал, напряжение которого U_1 прямопропорционально расчетному (номинальному) закону изменения мощности рассматриваемого приводного двигателя (рис. 9, кривая 1), а программируемый функциональный генератор 19 формирует электрический сигнал, напряжение U_2 которого прямопропорционально расчетному (номинальному) закону

изменения угловой скорости рассматриваемого приводного двигателя (рис. 6), тахогенератор 11 преобразует частоту вращения двигателя $\omega_{\text{мех}}$ в напряжение U_4 , которое при помощи реостата 12 выравнивается по величине с напряжением U_2 , тензодатчик преобразует крутящий момент двигателя в ток, который проходит через усилитель 15 и при помощи реостата 16 выравнивается до такой величины, которая при перемножении с напряжением U_4 в блоке 13 давала бы на его выходе сигнал, напряжение которого U_3 изменялось бы прямопропорционально действующей (измеренной) мощности $P_{\text{мех}}$ и по величине соответствовало бы напряжению U_1 . Устройство управления 28 изменяет напряжение U_y обмотки возбуждения в соответствии с требуемым жестким режимом работы приводного двигателя. Если по каким-либо внутренним причинам (уменьшением или увеличением переменной мощности или потерей как в двигателе, так и в редукторе) произошло уменьшение (увеличение) действительной (измеренной) мощности двигателя $P_{\text{мех}}$ по сравнению с расчетной (номинальной) P_p , тогда соответственно станет меньше (больше) по абсолютному значению напряжения U_3 , поступающее с блока 13 и запитывающее катушку 17, по сравнению с напряжением U_1 , поступающим с блока 1 и запитывающим катушку 2, произойдет нарушение равновесия, тяговое усилие F_2 станет меньше (больше) тягового усилия F_1 , под действием силы $F = \pm F_1 \pm F_2$ общий якорь 4 начнет двигаться влево (вправо), в результате чего произойдет увеличение (уменьшение) воздушного зазора магнитопровода 6 магнитной цепи, что вызовет увеличение (уменьшение) магнитного сопротивления данной магнитной цепи и соответственно уменьшение (увеличение) реактивного сопротивления катушки 7, что приведет к уменьшению (увеличению) мощности потребляемой на данной катушке и соответственно вызовет дополнительное увеличение (уменьшение) мощности, поступающей на обмотку возбуждения, что приведет к увеличению (уменьшению) мощности, подводимой непосредственно к двигателю и увеличению (уменьшению) мощности $P_{\text{мех}}$, снимаемой с двигателя, равновесие мощностей $P_p = P_{\text{мех}}$ и соответствующих им напряжений $U_1 = U_3$ восстановится.

Однако равенство мощностей $P_p = P_{\text{мех}}$ не означает, что двигатель 9 будет вращаться с необходимой угловой скоростью $\omega_{\text{мех}} = \omega_p$, для их выравнивания и необходим вспомогательный контур управления,

который работает следующим образом. Тахогенератор 11 преобразует частоту вращения двигателя $\omega_{\text{мех}}$ в напряжение U_4 , запитывающее катушку 26, если частота вращения ротора электродвигателя $\omega_{\text{мех}}$ станет меньше расчетной (номинальной) частоты ω_p , тогда соответственно станет меньше (больше) по абсолютному значению напряжение U_4 по сравнению с напряжением U_2 , поступающим с блока 19 и запитывающим катушку 20, произойдет нарушение равновесия, тяговое усилие одного электромагнита F_2 станет меньше тягового усилия другого электромагнита F_1 , под действием силы $F = \pm F_1 \pm F_2$ общий якорь 22 начнет двигаться влево (вправо), в результате чего произойдет увеличение (уменьшение) воздушного зазора магнитопровода 24 магнитной цепи, что вызовет увеличение (уменьшение) магнитного сопротивления данной магнитной цепи и соответственно уменьшение (увеличение) реактивного сопротивления катушки 25, что приведет к уменьшению (увеличению) напряжения, потребляемого на данной катушке, и соответственно вызовет дополнительное увеличение (уменьшение) напряжения, поступающего на обмотку возбуждения, что приведет к увеличению (уменьшению) частоты вращения двигателя.

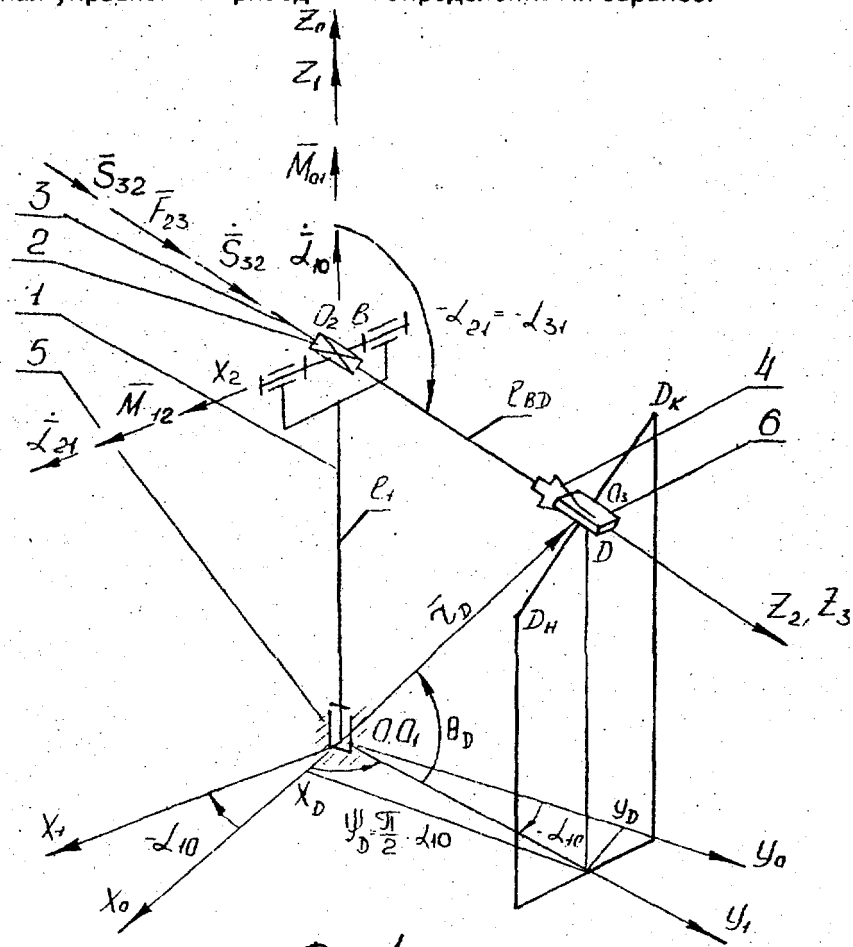
Таким образом, приведенный способ управления манипулятором позволяет решить поставленную цель, заключающуюся в повышении точности отработки закона движения и повышения надежности за счет возможности определения расчетных (номинальных) законов изменения обобщенных скоростей всех приводных двигателей и моментов (сил) всех приводов манипулятора, а также мощности этих приводных двигателей и измерения фактических моментов (сил) приводных двигателей, а также фактических мощностей, развиваемых этими двигателями, сравнения расчетных и фактических мощностей, а также расчетных и фактических обобщенных скоростей и по сигналу рассогласования между ними формирования дополнительного сигнала управления приводными двигателями.

Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

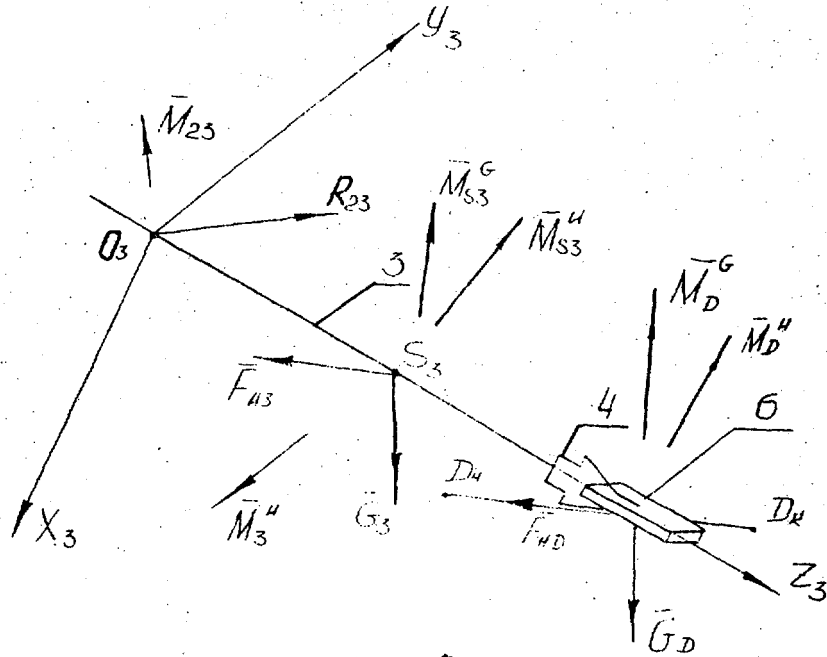
Способ управления манипулятором промышленного робота, заключающийся в том, что посредством системы управления формируют закон движения схвата и отработывают его приводами манипулятора, отличаясь от того, что, с целью повышения точности отработки закона движения и повышения надежности, измеряют фактиче-

ские обобщенные скорости и фактические моменты приводных двигателей, а также фактические мощности, развиваемые этими двигателями, а сигнал управления привод-

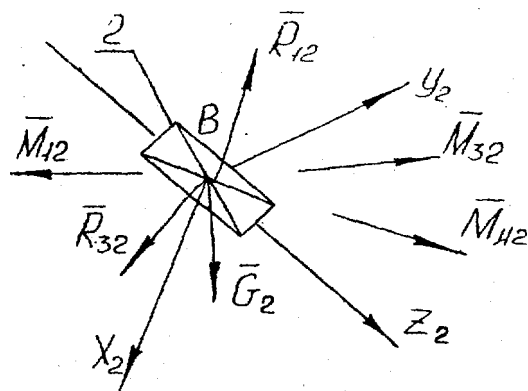
ными двигателями формируют на основании результатов сравнения измеренных величин с их расчетными значениями, определенными заранее.



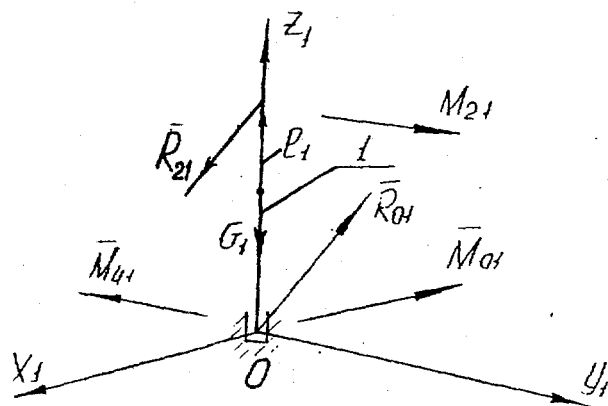
Фиг. 1



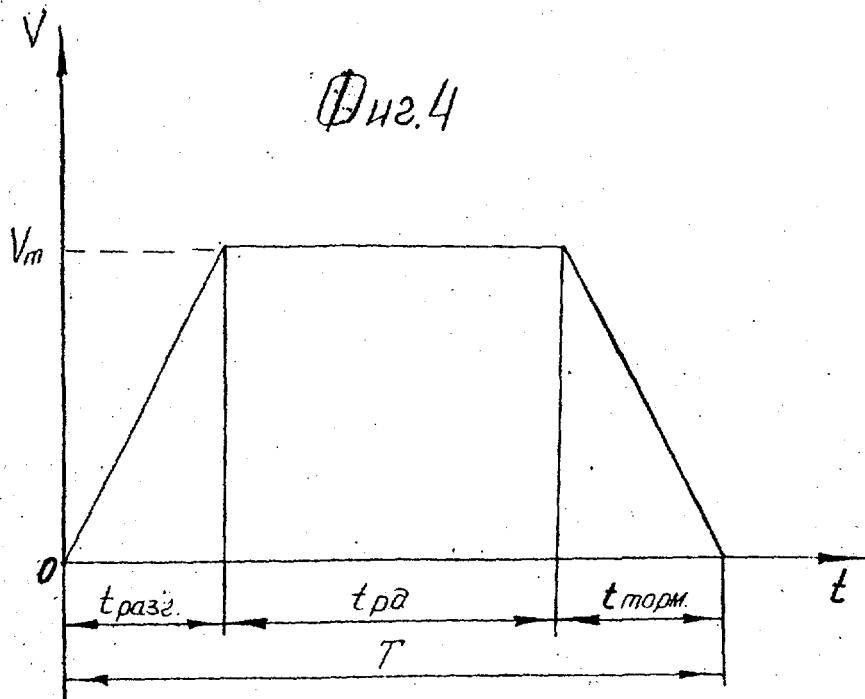
Фиг. 2



Фиг.3

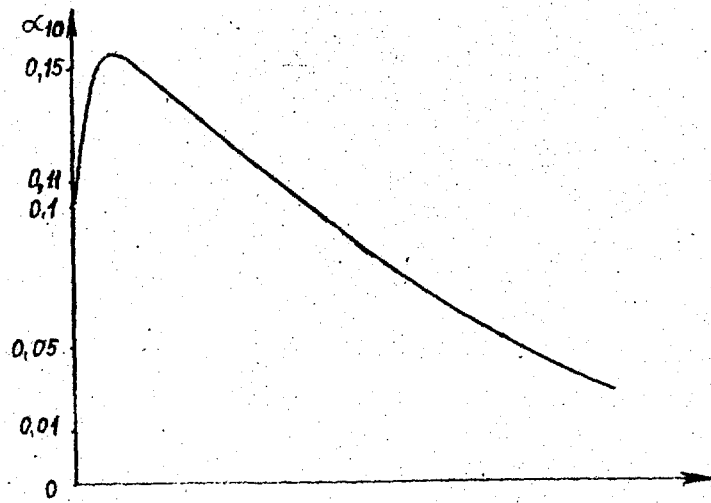
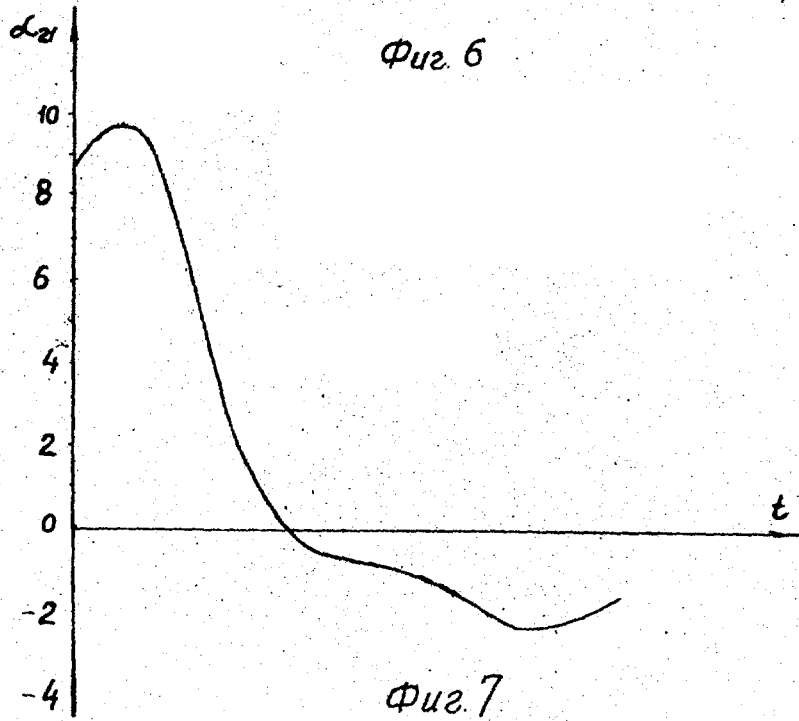
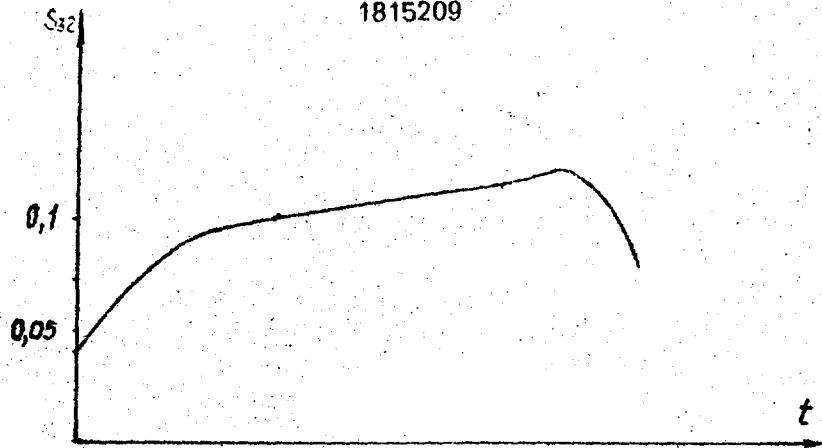


Фиг.4

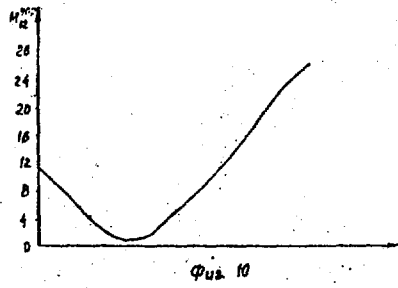
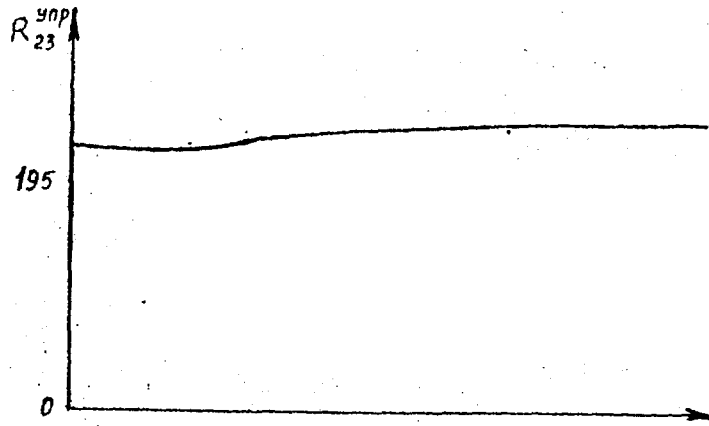


Фиг.5

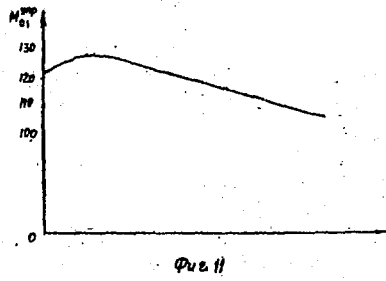
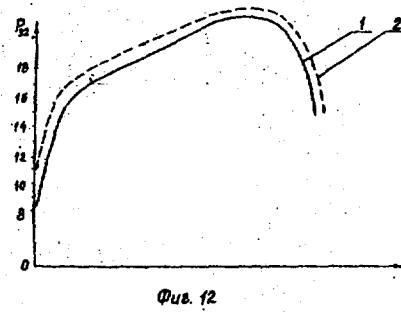
1815209



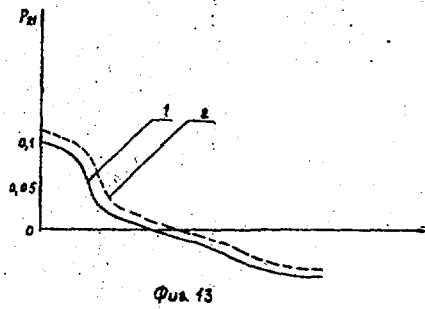
Фиг. 8



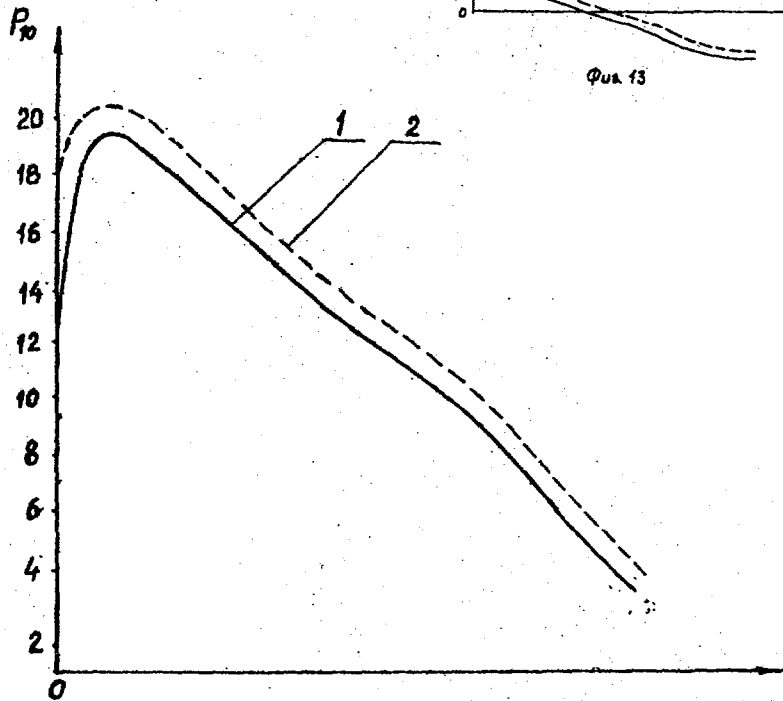
$\Phi_{uz. 9}$



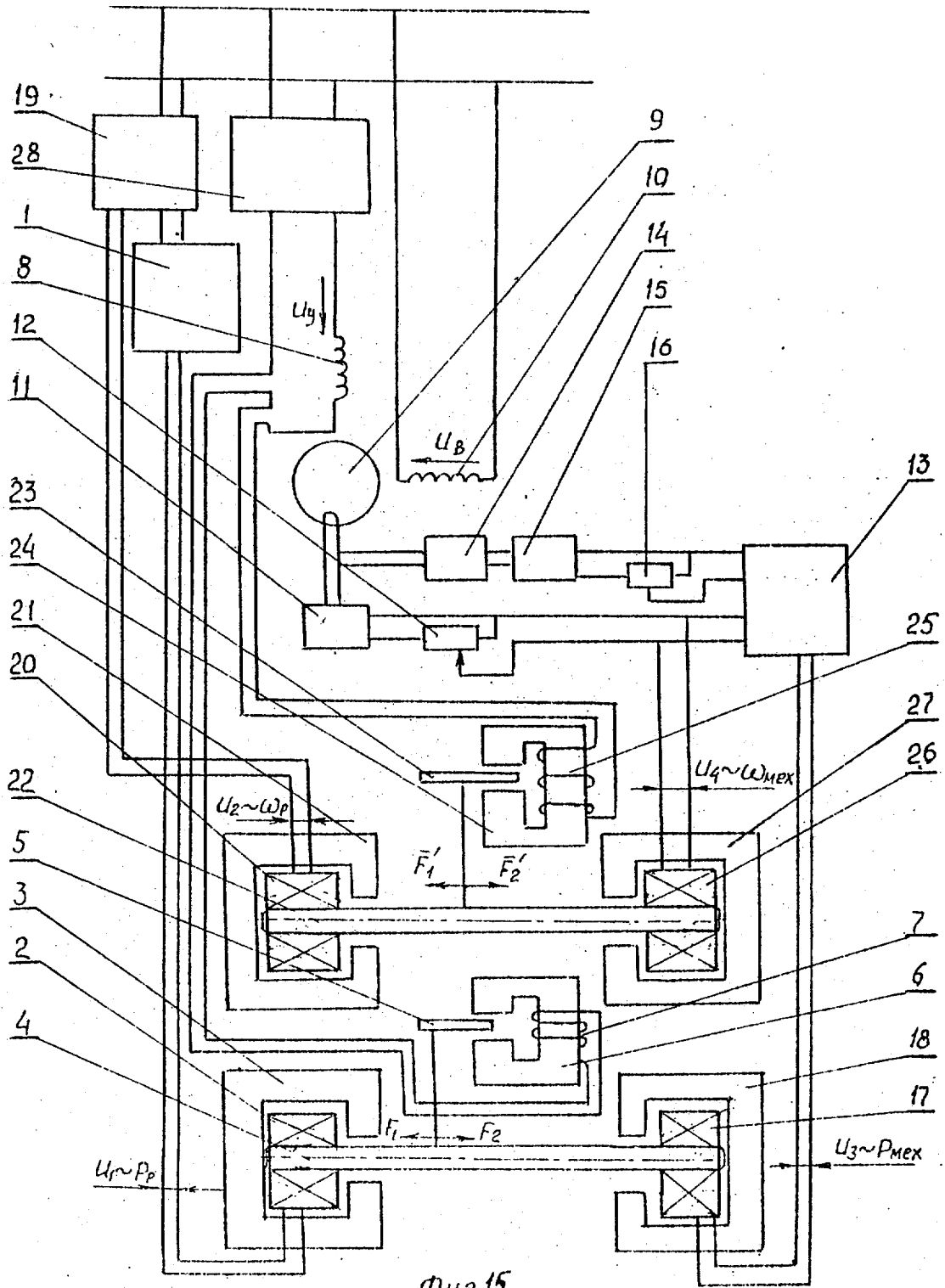
$\Phi_{uz. 11}$



$\Phi_{uz. 13}$



$\Phi_{uz. 14}$



Фиг.15

Редактор Г.Бельская

Составитель И.Филонов
Техред М.Моргентал

Корректор С.Лисина

Заказ 1615

Тираж

Подписное

ВНИИПИ Государственного комитета по изобретениям и открытиям при ГКНТ СССР
113035, Москва, Ж-35, Раушская наб., 4/5

Производственно-издательский комбинат "Патент", г. Ужгород, ул. Гагарина, 101