

# ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Соколовский Юлий**

Кандидат технических наук. Хайфа. (Израиль).  
Тел. +(972) 549065410, E-mail: sokol1937y@gmail.com

**Sokolovsky Yuliy**

Ph.D. Haifa. (Israel).  
Tel. +(972) 54 906 5410, E-mail: sokol1937y@gmail.com

**Аннотация.** Рассмотрены методы минимизации ошибок некоторого класса систем автоматического регулирования контуров положения. Например, летающих автономных объектов (ракет), электроприводов подач станков, обрабатывающих центров, и т.п.

## 1. Введение.

Известны технические решения, обеспечивающие повышение точности систем автоматического регулирования контуров положения (КП) при значительном разбросе динамических и статических характеристик объектов регулирования с заданными детерминированными функциями [1-3]. Недостатком этих работ является наличие только общих рекомендаций по минимизации ошибок. Ошибки возникают, например, в связи с отличием расчетных передаточных функций элементов КП от реальных при рассмотрении во всем рабочем диапазоне. Ликвидация вышеуказанных ошибок при совместной работе нескольких КП или, по крайней мере, их минимизация является актуальной задачей для некоторого класса КП с программным управлением. Например, для электроприводов подач станков, обрабатывающих центров, летающих автономных объектов (ракет) и т.п.

## 2. Постановка задачи

В данной работе рассмотрены варианты КП динамических объектов, заданная траектория которых аппроксимируется, например, отрезками прямых или дугами окружностей с соответствующими передаточными функциями

$$F(t)=At \rightarrow F(p)=A/p^2 \quad F(t)=A\sin\omega t \rightarrow \frac{A\omega}{\omega^2 + p^2} \quad F(t)=A\cos\omega t \rightarrow F(p)=\frac{Ap}{\omega^2 + p^2} \quad (1)$$

В многокоординатной системе КП с детерминированными задающими сигналами для отдельных координат траектории движущегося объекта предлагаются три методики минимизации контурных ошибок:

1) при наличии нескольких пространственных координат объекта (например 2-3) для более точной отработки заданной траектории необходима динамическая и статическая однозначная идентификация координат объекта (их КП), т.е. в основном, корректировка динамических и статических параметров объекта (передаточных функций КП отдельных координат, постоянных или изменяющихся несущественно).

2) при наличии нескольких пространственных координат объекта (например 2-3) для более точной отработки заданной траектории необходим учет динамических и статических параметров отдельных координат при движении объекта по заданной траектории и формирование дополнительного программного корректирующего сигнала предсказания заданной программы с учетом текущих динамических и статических параметров отдельных

координат объекта. По передаточным функциям корректирующего и задающего детерминированного сигналов определяют их временные функции, суммируют и подают на вход КП. В качестве объекта может быть система управления многокоординатного высокоточного станка, обрабатывающего центра, точного технологического робота, летающего объекта (например, ракеты) и т.п.

3) при наличии нескольких пространственных координат объекта (например 2-3) для более точной отработки заданной траектории необходим учет динамических параметров отдельных координат при их изменении в процессе движения объекта по заданной траектории, формирование дополнительного программного корректирующего сигнала предискажения заданной программы с учетом изменяющихся текущих динамических и статических параметров отдельных координат объекта (в виде частного от деления передаточной функции детерминированного сигнала управления в данном кадре на передаточную функцию разомкнутого контура положения КП соответствующей координаты). По детерминированному заданному сигналу и изменяющимся разомкнутым передаточным функциям объекта в операторной форме определяют входной скорректированный сигнал сначала в операторной форме, а затем и в виде временных функций. Затем их суммируют и подают на вход КП. В качестве объекта может быть система управления станка, обрабатывающего центра, точного технологического робота, летающего объекта (например, ракеты).

### 3. Методы анализа и решения поставленных задач.

#### 3.1. Минимизация контурных ошибок многокоординатного динамического объекта, движущегося по заданной траектории, за счет однозначной идентификации КП отдельных его координат.

Используем работы [1-3] по определению той части контурных ошибок, которые вызваны неидентичностью, нестабильностью динамических и статических параметров скоростных контуров (СК) и контуров положения (КП) отдельных координат объекта. Передаточная функция замкнутого КП для каждой совместно работающей координаты  $i$  имеет вид -  $W_{зКПi}(p)$ . Суммарная ошибка управления при движении объекта по траектории  $\delta_{кз}$  зависит от контурных ошибок отдельных координат объекта при разных способах аппроксимации заданной траектории на данном кадре программы и от контурной скорости  $V_k$ . Например, при отработке отрезков прямых (расположенных под углами  $Q_x, Q_y, Q_z$  относительно координатных осей X,Y,Z) ошибки КП отдельных координат  $\bar{b}_{кx}, \bar{b}_{кy}, \bar{b}_{кz}$  обратно пропорциональны их добротностям  $K_{vx}, K_{vy}, K_{vz}$ , а суммарная ошибка по контуру

$$\bar{b}_{кc} = \frac{V_k}{2} \sqrt{\frac{(K_{vx} - K_{vy})^2 * \sin^2 Q_x}{K_{vx}^2 * K_{vy}^2} + \frac{(K_{vy} - K_{vz})^2 * \sin^2 Q_y}{K_{vy}^2 * K_{vz}^2} + \frac{(K_{vz} - K_{vx})^2 * \sin^2 Q_z}{K_{vz}^2 * K_{vx}^2}} \quad (2)$$

При  $K_{vx}(t) = K_{vy}(t) = K_{vz}(t) \bar{b}_{кc} \rightarrow 0$ , но достичь приблизительно этого равенства редко удается.

С пропорциональным регулятором положения в виде пропорционального звена с чистым запаздыванием каждой координаты - 2 по Рис.1, для получения постоянной добротности всех координат необходимо, чтобы каждый скоростной контур (СК) также был представлен пропорциональным звеном с чистым запаздыванием в операторной форме [4] (см. также Приложение 1).

$$W_{зСК}(P) = K_{СК} * e^{-P\tau_{СК}} \quad (3)$$

$$W_{ПКПi}(p) = K_{ПКПi} e^{-P\tau_{ПКПi}} \quad (4)$$

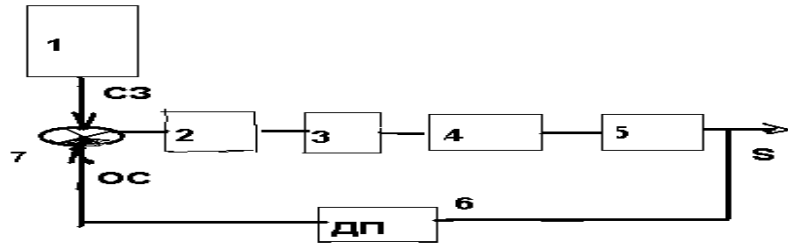


Рис.1. Структурная схема контура положения координат X,Y,Z...

1-задающий программный узел, 2-регулятор контура положения  $K_{PI}e^{-P\tau_{PI}}$ , 3-скоростной контур -  $K_{СК}e^{-P\tau}$ , 4-редуктор -  $t_B/i*2\pi$ , 5 - переход к положению механизма -  $1/p$ , 6 - датчик положения -  $K_{ДП}$ , 7 - узел сравнения (-1), S - траектория движения.

Варьируя параметры передаточной функции регулятора положения конкретной координаты  $K_{PI}e^{-P\tau_{PI}}$  с учетом передаточной функции скоростного контура этой координаты -  $K_{СК}e^{-P\tau_{СК}}$  мы получаем для всех координат (X Y Z) одинаковые передаточные функции разомкнутых и замкнутых КП.

$$K_{VX}(t) = K_{VY}(t) = K_{VZ}(t) = K_{Vi}, \quad \tau_{\Sigma X} = \tau_{\Sigma Y} = \tau_{\Sigma Z} = \tau_{\Sigma} = \tau_{PI} + \tau_{СК}, \quad (5)$$

При этом передаточная функция разомкнутого контура каждого i КП

$$W_{KPI}(P) = K_{Vi} * e^{-P\tau_{\Sigma}} * P^{-1} \quad (6)$$

Добротность контура каждого i КП

$$K_{Vi} = K_{PI} K_{СК} K_S K_{ДП} \quad (7)$$

где  $K_{ДП}$  - коэффициент усиления датчика положения,  $K_S$  - коэффициент перехода от скорости вращения привода к пути S.

Ошибка любого КП с детерминированными входными сигналами типа  $At$  по (1), например, по i координате (с учетом замены в (5)  $e^{-P\tau} \approx 1 - P\tau$ )

$$\delta_{Ki}(P) = F_i(p) * [1 + W_{KPI}(P)]^{-1} = A_i * K_{Vi}^{-1} [P + P^2(K_{Vi}^{-1} - \tau_{\Sigma})]^{-1} \quad (8)$$

Временная функция ошибки по i координате с учетом (5) и детерминированного сигнала F1(p) по (1)

$$\delta_{Ki}(t) = \delta_{KX}(t) = \delta_{KY}(t) = \delta_{KZ}(t) = A_i K_{Vi}^{-1} * (e^{-t(\tau_{\Sigma} - K_{Vi}^{-1})} - 1) \quad (9)$$

Аналогично определяется ошибка КП, например, по координате X в i-том кадре с детерминированным входным сигналом аппроксимации траектории фрагментом окружности

$$A * \sin \omega t \div F2(p) = \frac{A \omega}{\Omega^2 + P^2},$$

тогда

$$\bar{b}_{Ki}(P) = A_i \omega (\omega^2 + P^2) * [1 + K_{Vi} e^{-P\tau_\Sigma} P^{-1}]^{-1} \quad (10)$$

В этом случае временная функция ошибки  $\delta_{Ki}(t)$  в пределах  $i$ -кадра для всех координат

$$\delta_{Ki}(t) = A_i \omega K_{Vi}^{-1} [sh \frac{\omega}{t} - (K_{Vi}^{-1} + \tau) * e^{-t(K_{Vi}^{-1} + \tau_\Sigma)}] \quad (11)$$

Значения добротности КП отдельных координат в переходных режимах хотя и непостоянно, но обеспечивается их равенство в каждый момент переходного процесса, если  $K_{VX}(t) = K_{VY}(t) = K_{VZ}(t) = K_{Vi}$  и во всех КП обеспечивается одинаковое  $\tau_\Sigma$ .

Недостатком методики по 3.1, является то, что даже в случае представления передаточной функции скоростного контура в виде (3), она обеспечивает оценку ошибок по отдельным координатам заданной траектории, минимизирует их, но не решает задачу по кардинальной ликвидации этих ошибок.

### **3.2. Минимизация контурных ошибок многокоординатного динамического объекта, движущегося по заданной траектории, за счет формирования задающих корректирующих сигналов для каждого $j$ -кадра $i$ -координаты КП.**

Методика по 3.2. [4,5] позволяет кардинально минимизировать ошибки отдельных координат КП при точном определении их в разомкнутых передаточных функциях во всем рабочем диапазоне в операторной форме, в его определенных зонах и детерминированных сигналах управления (1) в операторной форме, заданных покадрово для каждой координаты X, Y, Z. На Рис.2,3 поясняется предлагаемая методика повышения точности, например, программно (или иным образом) задаваемой траектории динамического объекта, движущегося в пространстве (из двух, трех координат). Эффективность разработанной методики зависит от точности определения статических и динамических характеристик разомкнутого контура положения (КП) каждой координаты и введения этой информации в блок 6. На выходе блока задания траектории для каждой координаты Узад 5 формируется соответствующая информация в операторной форме (введенная предварительно или вводимая в процессе движения динамического объекта). Информация с этого блока поступает на первый вход блока 7. На второй вход блока коррекции 7 поступает информация с блока - 6, характеризующая динамические и статические характеристики динамического объекта во всем рабочем диапазоне или в его определенных зонах в операторной форме. В блоке 7 формируется корректирующий сигнал делением задающего детерминированного сигнала в операторной форме в  $j$ -кадре  $i$ -координаты на передаточную функцию разомкнутого контура КП  $i$ -координаты и суммирование с задающим детерминированным сигналом в операторной форме. Затем осуществляется преобразование этих двух слагаемых из операторной формы во временную функцию, являющуюся входным, задающим сигналом  $U_{BX}(t)$  для КП.  $U_{BX}(t)$  поступает на первый вход регулятора РКП - 1 одной из координат объекта. На второй его вход с датчика положения 4 -  $k_{ДП}$  поступает информация о положении объекта по данной координате в текущий момент времени. Информация с выхода регулятора РКП -1 поступает на скоростной контур ( регулятор  $-W$  зкс (P) -2), и далее на блок - 3 -  $k_v$  перехода от скорости к положению движущегося динамического объекта  $S(\psi)$  по данной координате.

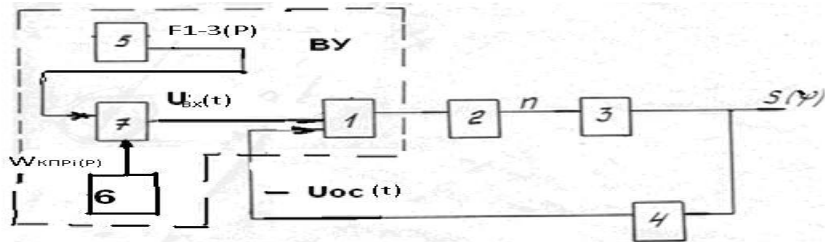


Рис.2. Блок-схема одной из координат динамического объекта, с высокоточной обработкой заданной траектории.

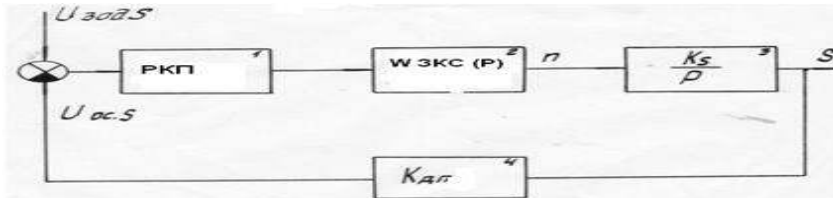


Рис.3. Структурная схема КП

На Рис.3 дана структурная схема варианта КП по  $i$  координате без учета упругих связей (с приведенным моментом инерции) и с регулятором положения 1 -  $K_{PII}e^{-p\tau_{PII}}$ , с замкнутым контуром регулятора скорости -  $W_{зск}(P)$  - 2 в виде апериодического звена  $K_{КС}/(1+T_{КС})$  или звена чистого запаздывания -  $K_{СК} * e^{-p\tau_{СК}}$ , а коэффициент перехода от скорости к пути  $K_S$  по (7).

По передаточным функциям замкнутого контура скорости  $W_{зск}(P)$  и регулятора положения  $i$ -координаты  $W_{PKPi}(p) = K_{PKPi}e^{-p\tau_{PKPi}}$  получаем по (6) передаточную функцию разомкнутого  $i$ -контура положения

$$W_{KPIi}(P) = K_{Vi} * e^{-p\tau_{\Sigma}} * P^{-1} \quad (13)$$

Для КП  $i$ -координаты передаточные функции замкнутого контура

$$W_{зкPi}(P) = W_{KPIi}(P) * [1 + W_{KPIi}(P)]^{-1} \quad (14)$$

Пусть желаемый закон движения  $i$ -координаты динамического объекта в  $j$ -кадре задается некоторым детерминированным сигналом в операторной форме по (1)  $F_n(p)$ . При идеальной обработке динамическим объектом заданного сигнала по  $i$ -координате в  $j$ -кадре с учетом скорректированного входного сигнала  $U_{BX}(P)$  получаем с учетом Рис.2.

$$S(P) = F(P) = U_{BX}(P) * W_{зкPi}(P), \quad U_{BX}(P) = U_{коррj}(P) + F(P) = F(P) / W_{зкPi}(P) \div U_{BX}(t) \quad (15)$$

Полученная временная функция скорректированного входного сигнала обеспечивает обработку заданного детерминированного сигнала  $i$  координатой объекта в  $j$ -кадре. С учетом (16) найдем корректирующий сигнал для реализации рассматриваемой методики ликвидации ошибок

$$U_{коррj}(P) = F_n(P) / W_{зкPi}(P) - F_n(P) = \frac{F_n(P)_j}{W_{KPIi}(P)} \quad (16)$$

**Корректирующий сигнал в операторной форме получен в виде частного от деления передаточной функции детерминированного сигнала управления в данном кадре  $j$  на**

передаточную функцию разомкнутого контура положения КП соответствующей координаты  $i$  в  $j$ -кадре.

Определим сигнал коррекции  $i$  координаты в  $j$ -кадре для КП по(3,5,7) при  $A_t \div F1(p) = A/p^2$ .

$$U_{коррjij}(P)_{ij} = \frac{A_{ij} * K_{Vi}^{-1} * e^{p\tau_\Sigma}}{P} \quad (17)$$

Входной скорректированный сигнал для  $i$ -КП в операторной форме равен

$$U_{BX}(P) = \frac{A_i}{P^2} + \frac{A_{ij} * K_{Vi}^{-1} * e^{p\tau_\Sigma}}{P} \quad (18)$$

Временная функция входного скорректированного сигнала для  $i$ -КП в этом случае

$$U_{BX}(t) = A_i * t + A_i * K_{Vi}^{-1} * (t + \tau_\Sigma) \quad (19)$$

Перейдем к новому отсчету времени управления движением объекта  $\theta = t + \tau_\Sigma$ . Тогда (19) будет равно

$$U_{BX}(\theta - \tau_\Sigma) = A_i(\theta - \tau_\Sigma) + A_i K_{Vi}^{-1} * \theta \quad (20)$$

Аналогично определяется ошибка КП по координате  $i$  в  $j$ -кадре с детерминированным входным сигналом аппроксимации траектории фрагментом окружности

$$A_i * \sin \omega t \div F2(p) = \frac{A_i \omega}{\omega^2 + P^2}$$

Входной скорректированный сигнал для  $i$ -КП в операторной форме равен

$$U_{BX}(P) = \frac{A_i \omega}{P^2 + \omega^2} + \frac{A_i \omega K_{Vi}^{-1} P e^{p\tau_\Sigma}}{P^2 + \omega^2} \quad (21)$$

Временная функция скорректированного сигнала для  $i$ -КП в этом случае

$$U_{BX}(t) = A_i \sin \omega t + A_i \omega K_{Vi}^{-1} \cos[\omega(t + \tau_\Sigma)] \quad (22)$$

Перейдем к новому отсчету времени управления движением объекта  $\theta = t + \tau_\Sigma$ . Тогда (22) будет равно

$$U_{BX}(\theta - \tau_\Sigma) = A_i \sin \omega(\theta - \tau_\Sigma) + A_i \omega K_{Vi}^{-1} \cos \omega \theta \quad (23)$$

Второе слагаемое в (23) - корректирующий сигнал для заданного управляющего сигнала  $A_i * \sin \omega t$ .

Для более распространенного случая при регуляторе КП  $-W_{PKIi}(p) = K_{PKIi} e^{-p\tau_{PKIi}}$ , передаточная функция замкнутых скоростных контуров имеют вид

$$W_{зсКи}(P) = \frac{K_{сКи}}{1 + T_{сКи}P} \quad (24)$$

При этом передаточная функция разомкнутого контура каждого i-КП с учетом (24) равна

$$W_{КППi}(P) = \frac{K_{Vi}e^{-P\tau_{PKPi}}}{P(1 + PT_{сКи})} \quad (25)$$

Входной скорректированный сигнал для i-КП в операторной форме при  $At \div F1(p) = A/p^2$  равен

$$U_{BX}(P) = \frac{A_i}{P^2} + A_i K_{Vi}^{-1} T_{сКи} e^{P\tau_{PKPi}} + A_i K_{Vi}^{-1} e^{P\tau_{PKPi}} * P^{-1} \quad (26)$$

Временная функция скорректированного входного сигнала для i-КП в j-кадре равна

$$U_{BX}(t) = A_i * t + A_i K_{Vi}^{-1} T_{сКи} \delta(t + \tau_{PKPi}) + A_i K_{Vi}^{-1} (t + \tau_{PKPi}) \quad (27)$$

Перейдем к новому отсчету времени управления движением объекта  $\theta = t + \tau_{PKPi}$ . Тогда (27) будет равно

$$U_{BX}(\theta - \tau_{PKPi}) = A_i(\theta - \tau_{PKPi}) + A_i K_{Vi}^{-1} T_{сКи} \delta(\theta) + A_i K_{Vi}^{-1} \theta \quad (28)$$

Второе и третье слагаемые в (28) - корректирующий сигнал для заданного управляющего сигнала  $\frac{A_i}{P^2}$ . Аналогично определяется скорректированный входной сигнал для КП по координате i в j-кадре с детерминированным входным сигналом аппроксимации траектории фрагментом окружности с учетом (24)

$$A_i * \sin \omega t \div F2(p) = \frac{A_i \omega}{\omega^2 + P^2} .$$

Так как  $T_{сК}$  обычно намного превышает  $\tau_{PKPi}$  принимаем  $W_{PKPiK} = K_{PKPi}$ . При этом передаточная функция разомкнутого i-контура равна

$$W_{КППi}(P) = \frac{K_{Vi} T_{сКи}^{-1}}{P(P + T_{сКи}^{-1})} \quad (29)$$

где  $K_{Vi} = K_{сКи} K_{РПКi} K_S K_{ДП}$

Входной скорректированный сигнал для i-КП в операторной форме при  $F2(p) = \frac{A_i \omega}{\omega^2 + P^2}$  равен



Рассмотрим вариант КП для варианта по (24), замкнутого и разомкнутого скоростного контура.

$$W_{зCKi}(P) = \frac{K_{CKi}}{1 + T_{CKi}P}, \quad W_{PCKi}(P) = \frac{K_0}{JP} \quad (32)$$

где J - приведенный момент инерции скоростного контура (пренебрегая упругостью между двигателем и механизмом).

С учетом (32) передаточная функция замкнутого контура скорости в операторной форме

$$W_{зCKi}(P) = \frac{\frac{K_0}{J}}{P + \frac{K_0}{J}} \quad (33)$$

Разомкнутая передаточная функция I КП с учетом (32,33) в операторной форме равна

$$W_{KППП}(P) = \frac{K_{Li}T_{CKi}^{-1}}{P(P + T_{CKi}^{-1})} \quad (34)$$

где  $T_{CKi} = \frac{J}{K_0}$ ,  $K_{Li} = K_{PЛи}K_{Si}K_{ДПi}$

Входной скорректированный сигнал для i-КП в операторной форме при  $F2(p) = \frac{A_i\omega}{\omega^2 + P^2}$  равен

$$U_{BX}(P) = \frac{A_i\omega}{\omega^2 + P^2} + A_iK_{Li}^{-1}T_{CKi}\omega \frac{P(P + T_{CKi}^{-1})}{P^2 + \omega^2} = \frac{A_i\omega}{\omega^2 + P^2} + \frac{A_iK_{Li}^{-1}\omega P}{P^2 + \omega^2} + A_iK_{Li}^{-1}\omega JK_0^{-1} - \frac{A_iK_{Li}^{-1}\omega^3 JK_0^{-1}}{P^2 + \omega^2} \quad (35)$$

Временная функция скорректированного входного сигнала для i-КП в j кадре равна

$$U_{BX}(t) = A_i * \sin \omega t + A_i K_{Li}^{-1} \omega [\cos \omega t + JK_0^{-1} \delta(t) - JK_0^{-1} \omega \sin \omega t] \quad (36)$$

Второе слагаемое в (36) - корректирующий сигнал для заданного управляющего сигнала

$$\frac{A_i\omega}{\omega^2 + P^2}.$$

## Литература

1. Б.И. Андрейчиков. Динамическая точность систем программного управления станками. Издательство Машиностроение. М.1964г.
2. М.М. Кузнецов, М.В.Майоров. Анализ точности работы следящего привода станка. Изв. вузов Машиностроение. № 10, 1969г.
3. Лебедев А.М. Следящие приводы станков с ЧПУ. М.Энергоатомиздат,1988г.
4. Диссертация к.т.н. Соколовского Ю.Б. в форме научного доклада «Электропривод подачи тяжелых станков, работающих в режиме контурной обработки». ОПИ, Одесса, 1991г., специальность 05.09 - «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование».

5. Шорников Ю В., Соколовский Ю.Б. Методика повышения точности программных сигналов на станках с ЧПУ с использованием инструментальных средств ИСМА. Научный вестник НГТУ №1 (16), с17-23. Новосибирск, 2004г.

6. Соколовский Ю.Б., Греков Н.Г., Зырянов В.Н. Устройство для определения статического момента двигателя постоянного тока. SU № 1010935 А1 от15.05.91г, Бюл.№18.

## Приложение 1

### Разработка скоростного контура (СК), идентифицируемого звеном чистого запаздывания [1].

В Новосибирском ПО Тяжстанкогидропресс для тяжелых станков был разработан и внедрен трехкоординатный электропривод подач постоянного тока ЭВ-6 с КП и СК, на базе вентильного преобразователя. Разработанный СК обеспечивает инвариантность к основным возмущающим воздействиям: возмущениям по нагрузке, изменению момента инерции, изменению токового режима (непрерывный-РНТ или прерывистый-РПТ). Требование идентичности СК для совместно работающих координат КП предполагает наличие одной и той же передаточной функции замкнутого скоростного контура  $W_{СК}(P) = K_{СК} * e^{-P\tau_{СК}}$

Независимо от параметров двигателя постоянного тока, электромагнитной постоянной  $T_p$ , токового режима и приведенного момента инерции электропривода  $J_{пр}$ . Такой СК получен в виде компенсационной системы автоматического регулирования. Реализация такого СК возможна при статической и динамической линеаризации всех его элементов в зоне рабочих частот электропривода. Для этого были разработаны специальные средства [2]. На Рис.П1 дана блочная схема такого СК одной из координат.

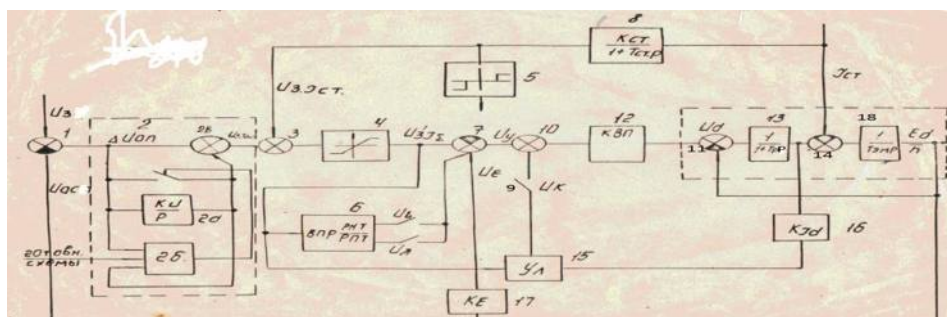


Рис.П1. Блочная схема СК.

1-узел сравнения, 2 - Пи регулятор со сбросом, 3 - узел суммирования с положительной связью по статическому моменту, 4 - узел ограничения тока, 5 - узел защиты от превышения статического момента на валу механизма, 6 - узел компенсации инерции якорной цепи в РНТ и РПТ, 7 - узел суммирования с положительной связью по ЭДС двигателя, 8 - датчик статического момента, 9 - ключ коррекции, 10 - узел суммирования с сигналом коррекции, 11- узел суммирования естественной отрицательной обратной связи по ЭДС, 12 – конструктив Вентильного Преобразователя, 13 - якорная цепь двигателя, 14 - узел суммирования реального статического момента, 15 - узел линеаризации ВП, 16 - датчик якорного тока, 17 - коэффициент компенсации по ЭДС - положительная связь, 18 - приведенный коэфф. момента инерции

$$T_{ЭМ} = \frac{J_{пр}}{C_M \Phi}$$

Для оптимизации структуры СК введены [3-6] устройство компенсации инерции якорной цепи (вычислитель первой разности с синхронизацией от импульсов управления КВП), компенсации ЭДС двигателя и компенсации сигнала статического момента. Для снижения

перерегулирования в режиме больших возмущений по управлению и нагрузке, а также для повышения запаса устойчивости применен ПИ-регулятор с обнулением интегрального канала [7]. При этом регулятор скорости вырождается в регулятор тока. Результаты экспериментальной проверки динамических характеристик такого СК данные в Таблице ФЧХ подтверждают, что с приемлемой точностью СК идентифицируется однозначно звеном чистого запаздывания  $W_{зск}(P) = K_{ск} * e^{-P\tau_{ск}}$  в непрерывном (РНТ) и прерывистом (РПТ) токовых режимах. Где  $\tau_{ск}=0.0038$ сек.

**Таблица ФЧХ**

F(Гц)	10	15	20	30	35	40	45	
$A(\omega)$	1	0,98	0,97	0,96	0,95	0,95	0,94	РНТ
$\varphi(\omega)$	-11	-24	-32	-42	-51	-58	-62	РНТ
$A(\omega)$	1	1	1	0,98	0,95	0,92	0,91	РПТ $\lambda=0,6$
$\varphi(\omega)$	-8	-23	-30	-43	-51	-60	-64	РПТ $\lambda=0,6$

## Литература

1. Диссертация к.т.н. Соколовского Ю.Б. в форме научного доклада «Электропривод подачи тяжелых станков, работающих в режиме контурной обработки». ОПИ, Одесса, 1991г., специальность 05.09 - «Электротехнические комплексы и системы, включая их управление и регулирование».
2. Соколовский Ю.Б. Датчики вентильного электропривода. Сб. «Системы и устройства электромеханики», НЭТИ, Новосибирск. 1982г., с.115-125.
3. Соколовский Ю.Б., Кутузов Е.И. и др. Вентильный электропривод постоянного тока с компенсационными связями. Сб. «Электромеханические системы воспроизведения движения». НЭТИ, Новосибирск, 1981г., с. 150-156.
4. Соколовский Ю.Б., Корниенко В.Г. и др. Быстродействующий станочный электропривод. Сб. «Вопросы разработки комплектных электроприводов с предельными показателями», НЭТИ, Новосибирск, 1982г. с. 121-126.
5. Городинский И.В., Соколовский Ю.Б., Широченко Г.И. Дифференцирующее устройство на базе интегрального амплитудно-импульсного модулятора. Сб. «Широкополосные устройства СВЧ и системы оптимальной обработки сигналов», НЭТИ, Новосибирск, 1976г., с. 126-129.
6. Соколовский Ю.Б. А.С. № 964491, СССР.МКИ G 01 L 3|00. Способ измерения статического момента электродвигателя. Б.И.№37. 1982г.
7. Корниенко В.Г., Соколовский Ю.Б., Тув А.М., Хархалис Р.С. А.С. № 957396, СССР, МКИ H 02P 5/06. Регулятор скорости электропривода. Б.И. №33,1982г.

## Приложение 2

### Датчик для определения электромеханических характеристик электродвигателя.

Разработан датчик для определения статического момента электродвигателя с переменными электромеханическими характеристиками [1]. Хотя конкретный датчик разработан для двигателя постоянного тока, но с учетом [ 2] аналогичный датчик может быть разработан для любого типа двигателей. На Рис.П2 приведена структурная схема датчика. Ротор-1 двигателя постоянного тока представлен компаратором - 1а, на входы которого подается якорный ток -  $I_D$  и условный статический ток-  $I_{ст}$ , соответствующий приложенному к валу двигателя внешнему статическому моменту-  $M_{ст}$ . 1б – инерционный маховик ротора с обмоткой возбуждения соответствует выражению

$$\frac{C_M \Phi}{PJ_{\text{пр}}} = \frac{1}{T_{\text{и}} P}$$

где -  $C_M$  - постоянный коэффициент,  $\Phi$  - поток возбуждения двигателя,  $J_{\text{пр}}$  - приведенный момент инерции механизма,  $P$  - операция интегрирования, 2- датчик якорного тока двигателя  $I_D$ . Сигнал на его выходе пропорционален электромагнитному моменту двигателя -  $M_{\text{эл}}$ . Датчик - 2 подключен ко входу математической модели 3 ротора 1. В состав модели 3 входит компаратор 3а, делительное устройство 3б и интегратор 3в с постоянной интегрирования -  $T_{\text{и}}$  по (1). Выходы датчика скорости двигателя 4 и скоростного выхода математической модели 3в подаются на компаратор 5. Выходной сигнал последнего через регулятор 6 подается на компаратор 3а и пропорционален статическому моменту на валу двигателя -  $M_{\text{ст}}$ . Кроме того скоростные выходы 4 и 3в подключены через соответствующие дифференцирующие устройства с компаратором 9, на выходе которого получают сигнал пропорциональный приведенному моменту инерции механизма -  $J_{\text{пр}}$ .

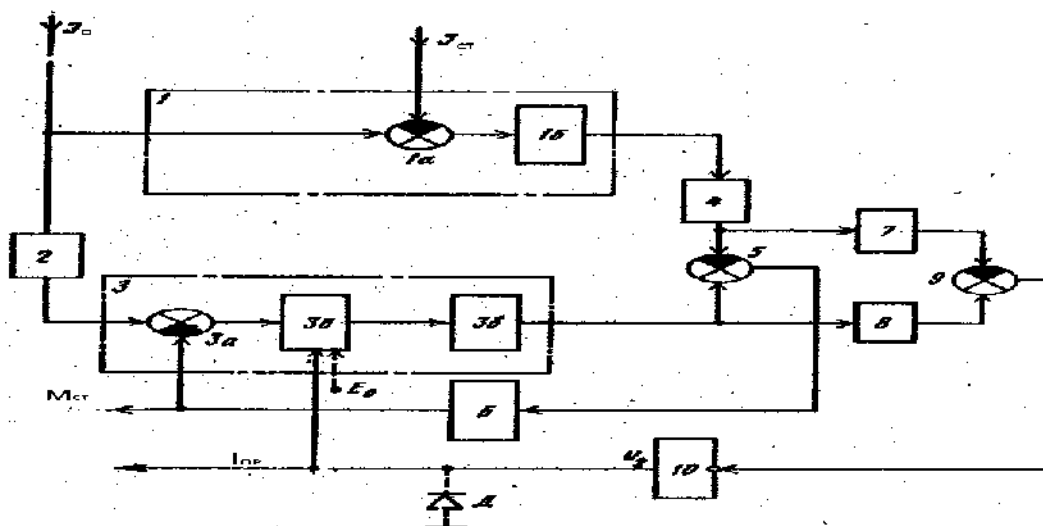


Рис.П2. Датчик для определения электромеханических характеристик электродвигателя.

## Литература

1. Соколовский Ю.Б., Греков Н.Г., Зырянов В.П. Устройство для определения статического момента двигателя постоянного тока. SU №1010935 от 15.05.91г. Бюл.№18. 1991г.
2. Соколовский Ю.Б. Устройство для вычисления статического момента вентильного электропривода. А.С. № 947880, СССР, МКИ G06, G7/62. Опубликовано 30.07.82. Б.И. №28. 1982