

РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТОЙКИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО КООРДИНАТНО-РАСТОЧНОГО СТАНКА С КОМПЛЕКСОМ ГИДРОДОМКРАТОВ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

© 2016

М.А. Рубцов, аспирант кафедры «Сервис технических и технологических систем»
Поволжский государственный университет сервиса, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: горизонтальный координатно-расточной станок; силовые деформации; динамическая модель; объект управления; гидродомкрат; статическая настройка.

Аннотация: Металлорежущее оборудование является одной из основ машиностроительного производства. Горизонтальные координатно-расточные станки, используемые в машиностроении, позволяют с высокой точностью и производительностью обрабатывать заготовки различных размеров и большой сложности. При этом на точность обработки оказывает влияние множество факторов, но основу составляет геометрическая точность самого технологического оборудования. От точности машины зависят ее работоспособность, надежность, экономичность, производительность, уровень вибрации и шума, а также качество выпускаемой продукции. Силовые деформации изгиба и кручения станин горизонтальных координатно-расточных станков, возникающие при перемещении стойки станка по станине, приводят к смещениям центра обрабатываемого отверстия, например, при расточке. Предлагается установить два исполнительных элемента вертикальных перемещений в стык между салазками и основания стойки станка. Примером таких исполнительных элементов являются гидродомкраты. При этом стойка станка с комплексом гидродомкратов служит объектом управления и регулирования. При изменении в них давления рабочей жидкости происходит перемещение переднего края стойки. В статье приведена разработка динамической модели стойки с комплексом гидродомкратов горизонтального координатно-расточного станка, станины которого претерпевают силовые деформации изгиба и кручения. Объектом исследования стал станок модели 2А459АФ4. Рассмотрены реакции в точках установки гидродомкратов. Найдены аналитические выражения, на основе которых построены структурные схемы объекта управления с комплексом гидродомкратов по отношению к возмущающему воздействию и каналов по управлению. Определена передаточная функция объекта по возмущающему и управляющему воздействиям, позволяющая синтезировать систему статической настройки технологической системы координатно-расточных станков.

Из-за сложности конструктивных исполнений современных координатно-расточных станков (КРС) факторов, влияющих на точность обработки, множество, но основу составляет геометрическая точность самих станков. Поэтому повышение точности таких станков является весьма актуальной научно-технической задачей.

Силовые деформации изгиба и кручения станин КРС, возникающие при перемещении стойки станка по станине, приводят к смещениям центра обрабатываемого отверстия, например, при расточке. Было предложено установить в стык между салазками и стойкой станка гидродомкраты, которые позволят компенсировать угловые перемещения стойки.

Целью настоящей работы является разработка динамической модели стойки станка с комплексом гидродомкратов как объекта управления на основе горизонтального КРС модели 2А459АФ4. В работе динамическая модель стойки станка рассматривается как одно-массовая [1–4]; она установлена на трех опорах, одна из которых представляет собой жесткий опорный элемент шарнирного типа, а два других – гидравлические домкраты с коэффициентами жесткости C_1 , C_2 , C_3 и демпфирования β_1 , β_2 и β_3 соответственно (рисунок 1).

Воздействие силы резания $P(t)$, приложенной к стойке станка, представляется как $P(t)$ с координатой z_p [5–8].

Для того чтобы найти реакции в точках установки гидродомкратов между стойкой станка и салазками, представим стойку в виде абсолютно жесткой рамы $JFHDCB$ (рисунок 2), на которую действуют следующие силы:

– вес стойки станка G_{cm} ;

– сила резания $P(t)$;

– реакции опор R_J , R_F и R_H .

Так как в точке J перемещения от силовых деформаций станины минимальны, то использован опорный элемент шарнирного типа. В точках F и H установлены гидродомкраты [9–11].

Найдем реакции опор R_J , R_F и R_H и определим величины перемещений в точках J , F и H .

$$\begin{aligned} Y_F &= \frac{R_F}{C_1} = \left(1 + \frac{1}{2} G_{cm} - \frac{z_p}{l_1}\right) \frac{P(t)}{C_1} \frac{l_2}{(l_2 + l_3)}, \\ Y_H &= \frac{R_H}{C_2} = \left(1 + \frac{1}{2} G_{cm} - \frac{z_p}{l_1}\right) \frac{P(t)}{C_2} \frac{l_2}{(l_2 + l_3)}, \\ Y_J &= \frac{R_J}{C_3} = \frac{G_{cm}}{2C_3} + \frac{P(t)z_p}{l_1 C_3}. \end{aligned} \quad (1)$$

Величины реакций, а следовательно, и перемещения в точках F , H и J связаны с координатой z_p в точке приложения силы резания $P(t)$. Учитывая, что гидродомкраты предполагается установить в точках F и H салазок, проанализируем перемещения в этих точках.

Так, перемещение в точке F состоит из отдельных составляющих перемещений.

$$Y_F = Y_f + Y_1(t) + Y_2(t) + Y_3(t) + Y_4(t), \quad (2)$$

где Y_f , $Y_1(t)$, $Y_2(t)$, $Y_3(t)$ и $Y_4(t)$ – перемещения, вызванные: смещением точки F контакта режущего инструмента

и заготовки; контактными деформациями «основание салазок – опорная часть гидродомкрата»; контактными деформациями «опорная часть гидродомкрата – мембрана гидродомкрата»; сжимаемостью жидкости гидравлического давления из-за наличия пузырьков воздуха в системе; контактными деформациями «основание гидродомкрата – основание станины» соответственно.

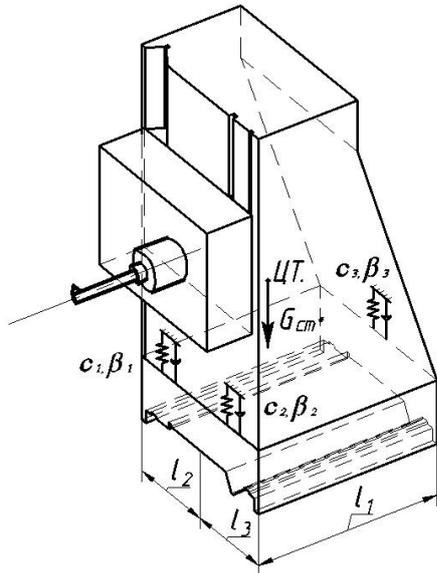


Рис. 1. Динамическая модель стойки станка

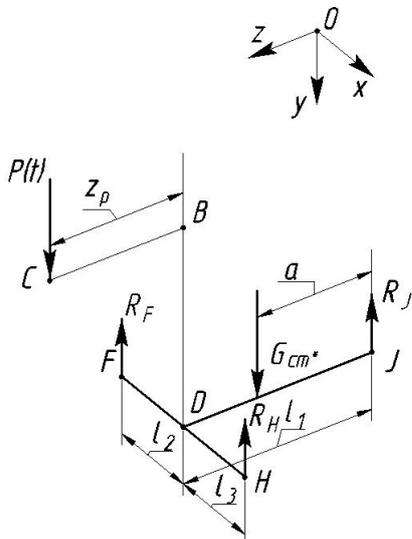


Рис. 2. Определение перемещений заготовки в точках установки опор

Перемещение в точке H также можно представить как отдельные составляющие перемещений

$$Y_H = Y_f + Y_5(t) + Y_6(t) + Y_7(t) + Y_8(t),$$

где $Y_5(t)$, $Y_6(t)$, $Y_7(t)$ и $Y_8(t)$ – перемещения, вызванные: контактными деформациями «основание салазок – опорная часть гидродомкрата»; контактными деформациями «опорная часть гидродомкрата – мембрана гидродомкрата»; сжимаемостью жидкости гидравлического давления; контактными деформациями «основание гидродомкрата – основание станины» соответственно.

Составляющие перемещений обусловлены коэффициентами жесткости C_i , демпфирования β_i .

Представим стойку с комплексом гидродомкратов как динамическую модель с приведенной массой m_{np} по отношению к возмущающему воздействию P_f , приложенную в точке F (рисунок 3).

Представим отдельные точки I...V динамической модели в линейной постановке. Тогда их можно представить следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} Y_I(t) &= Y_f(t) + Y_{1np}(t) + Y_{2np}(t) + Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t), \\ Y_{II}(t) &= Y_{1np}(t) + Y_{2np}(t) + Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t), \\ Y_{III}(t) &= Y_{2np}(t) + Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t), \\ Y_{IV}(t) &= Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t), \\ Y_V(t) &= Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t), \\ Y_{VI}(t) &= Y_{5np}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

где:

$$\begin{aligned} Y_{1np}(t) &= Y_I(t) - Y_6(t), \quad Y_{2np}(t) = Y_2(t) - Y_7(t), \\ Y_{3np}(t) &= Y_3(t) - Y_8(t), \quad Y_{4np}(t) = Y_4(t) - Y_9(t), \\ Y_{5np}(t) &= Y_5(t) - Y_{10}(t), \\ Y_I(t) - Y_{II}(t) &= Y_f(t), \quad Y_{II}(t) - Y_{III}(t) = Y_{1np}(t), \\ Y_{III}(t) - Y_{IV}(t) &= Y_{2np}(t), \quad Y_{IV}(t) - Y_V(t) = Y_{3np}(t), \\ Y_V(t) - Y_{VI}(t) &= Y_{4np}(t), \quad Y_{VI}(t) = Y_{5np}(t). \end{aligned}$$

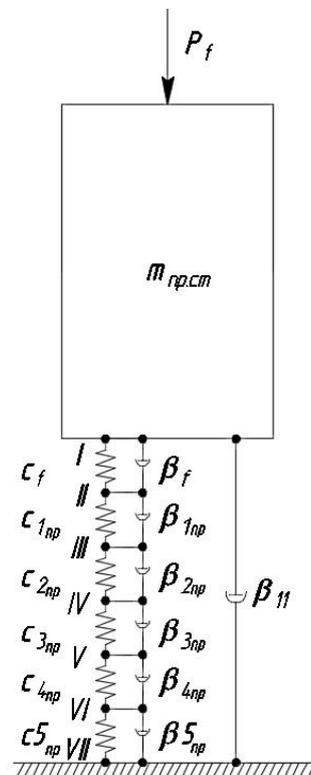


Рис. 3. Динамическая модель стойки станка с комплексом гидродомкратов

Перемещение точки D стойки удовлетворяет системе дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
 P(t) &= m_{cm} \frac{d^2 Y_I}{dt^2} + C_f (Y_I - Y_{II}) + \\
 &+ \beta_f \left(\frac{dY_I}{dt} - \frac{dY_{II}}{dt} \right) + \beta_{11} \frac{dY_I}{dt}, \\
 C_f (Y_I - Y_{II}) + \beta_f \left(\frac{dY_I}{dt} - \frac{dY_{II}}{dt} \right) &= \\
 &= C_{1np} (Y_{II} - Y_{III}) + \beta_{1np} \left(\frac{dY_{II}}{dt} - \frac{dY_{III}}{dt} \right), \\
 C_{1np} (Y_{II} - Y_{III}) + \beta_{1np} \left(\frac{dY_{II}}{dt} - \frac{dY_{III}}{dt} \right) &= \\
 &= C_{2np} (Y_{III} - Y_{IV}) + \beta_{2np} \left(\frac{dY_{III}}{dt} - \frac{dY_{IV}}{dt} \right), \\
 C_{2np} (Y_{III} - Y_{IV}) + \beta_{2np} \left(\frac{dY_{III}}{dt} - \frac{dY_{IV}}{dt} \right) &= \\
 &= C_{3np} (Y_{IV} - Y_V) + \beta_{3np} \left(\frac{dY_{IV}}{dt} - \frac{dY_V}{dt} \right), \\
 C_{3np} (Y_{IV} - Y_V) + \beta_{3np} \left(\frac{dY_{IV}}{dt} - \frac{dY_V}{dt} \right) &= \\
 &= C_{4np} (Y_V - Y_{VI}) + \beta_{4np} \left(\frac{dY_V}{dt} - \frac{dY_{VI}}{dt} \right), \\
 C_{4np} (Y_V - Y_{VI}) + \beta_{4np} \left(\frac{dY_V}{dt} - \frac{dY_{VI}}{dt} \right) &= \\
 &= C_{5np} Y_{VI} + \beta_{5np} \frac{dY_{VI}}{dt}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

где $C_{1np}, C_{2np}, C_{3np}, C_{4np}, C_{5np}$ – приведенные коэффициенты жесткости в стыках «основание салазок – опорная часть гидродомкрата», резьбовое соединение «основание гидродомкрата – корпус гидродомкрата», «опорная часть гидродомкрата – мембрана гидродомкрата», сжимаемости жидкости гидравлического давления и в зоне контакта «основание гидродомкрата – основание станины» соответственно;

$\beta_{1np}, \beta_{2np}, \beta_{3np}, \beta_{4np}, \beta_{5np}$ – приведенные коэффициенты демпфирования в стыках «основание салазок – опорная часть гидродомкрата», резьбовое соединение «основание гидродомкрата – корпус гидродомкрата», «опорная часть гидродомкрата – мембрана гидродомкрата», сжимаемости жидкости гидравлического давления и в зоне контакта «основание гидродомкрата – основание станины» соответственно.

Решение задачи стабилизации взаимного расположения осей растачиваемого отверстия и инструмента наиболее эффективно достигается тогда, когда гидродомкрат устанавливается в точках F и H базирования заготовки. Точка C является приведенной точкой F и H . Следовательно, все уравнения движения будут записываться относительно точки C . Это упрощает написание уравнений движения.

Запишем систему уравнений (4) в операторной форме.

$$\left. \begin{aligned}
 P(p) &= m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p^2 - \\
 &- \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) p = \\
 &= \frac{1}{C_f} (T_f p + 1) Y_f(p), \\
 P(p) &= m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s^2 - \\
 &- \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s = \\
 &= \frac{1}{C_{1np}} (T_1 p + 1) Y_{1np}(p), \\
 P(p) &= m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s^2 - \\
 &- \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s = \\
 &= \frac{1}{C_{2np}} (T_2 p + 1) Y_{2np}(p), \\
 P(p) &= m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s^2 - \\
 &- \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s = \\
 &= \frac{1}{C_{3np}} (T_3 p + 1) Y_{3np}(p), \\
 P(p) &= m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s^2 - \\
 &- \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s = \\
 &= \frac{1}{C_{4np}} (T_4 p + 1) Y_{4np}(p), \\
 P(p) &= m_{np} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s^2 - \\
 &- \beta_{11} (Y_f + Y_{1np} + Y_{2np} + Y_{3np} + Y_{4np} + Y_{5np}) s = \\
 &= \frac{1}{C_{5np}} (T_5 p + 1) Y_{5np}(p).
 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

На основании системы уравнений (5) можно построить структурную схему объекта управления стойки с комплексом гидродомкратов по отношению к возмущающему воздействию $P(t)$.

Выходной управляемой величиной следует принять вертикальное перемещение точки C , в которой приложена сила резания $P(t)$.

$$Y_{вых}(t) = Y_f(t) + Y_{1np}(t) + Y_{2np}(t) + Y_{3np}(t) + Y_{4np}(t) + Y_{5np}(t)$$

Найдем передаточную функцию объекта согласно структуре, изображенной на рисунке 4.

$$\begin{aligned}
 W_{возм}(p) &= \frac{Y_{вых}(p)}{P_f(p)} = \\
 &= \frac{\frac{1}{C_{1np}} + \frac{1}{C_{2np}} + \frac{1}{C_{3np}} + \frac{1}{C_{4np}} + \frac{1}{C_{5np}}}{T_1 p + 1 + T_2 p + 1 + T_3 p + 1 + T_4 p + 1 + T_5 p + 1} \\
 &+ \frac{\left(\frac{1}{C_f} + \frac{1}{C_{1np}} + \frac{1}{C_{2np}} + \frac{1}{C_{3np}} + \frac{1}{C_{4np}} + \frac{1}{C_{5np}} \right)}{\left(T_f p + 1 + T_1 p + 1 + T_2 p + 1 + T_3 p + 1 + T_4 p + 1 + T_5 p + 1 \right)} \left(\beta_{11} p + m_{np} s^2 \right)
 \end{aligned} \tag{6}$$

При использовании в системе автоматической стабилизации двух гидродомкратов в уравнение движения вместо коэффициента демпфирования необходимо ввести значение приведенного коэффициента $\beta_{11}^* = \beta_{11} + \beta_{11np}$, учитывающего действие обоих домкратов [12–14]. При рассмотрении объекта в качестве управ-

ляющего воздействия принимается усилие, развиваемое гидродомкратом. Представим динамическую модель объекта регулирования при действии силы $F_{ГД}$, развиваемой гидродомкратом (рисунок 5) [15–17]. Найдем дифференциальные уравнения движения точки С инструмента.

$$\left. \begin{aligned}
 F_{ГД}(t) &= C_{11}(Y_{VII} - Y_I) + \beta_{11} \left(\frac{dY_{VII}}{dt} - \frac{dY_I}{dt} \right), \\
 C_{11}(Y_{VII} - Y_I) + \beta_{11} \left(\frac{dY_{VII}}{dt} - \frac{dY_I}{dt} \right) &= m_{np} \frac{d^2 Y_I}{dt^2} + C_f(Y_I - Y_{II}) + \beta_f \left(\frac{dY_I}{dt} - \frac{dY_{II}}{dt} \right) + \beta_{1f} \frac{dY_I}{dt}, \\
 C_f(Y_I - Y_{II}) + \beta_f \left(\frac{dY_I}{dt} - \frac{dY_{II}}{dt} \right) + \beta_{1f} \frac{dY_I}{dt} &= C_{1np}(Y_{II} - Y_{III}) + \beta_{1np} \left(\frac{dY_{II}}{dt} - \frac{dY_{III}}{dt} \right), \\
 C_{1np}(Y_{II} - Y_{III}) + \beta_{1np} \left(\frac{dY_{II}}{dt} - \frac{dY_{III}}{dt} \right) &= C_{2np}(Y_{III} - Y_{IV}) + \beta_{2np} \left(\frac{dY_{III}}{dt} - \frac{dY_{IV}}{dt} \right), \\
 C_{2np}(Y_{III} - Y_{IV}) + \beta_{2np} \left(\frac{dY_{III}}{dt} - \frac{dY_{IV}}{dt} \right) &= C_{3np}(Y_{IV} - Y_V) + \beta_{3np} \left(\frac{dY_{IV}}{dt} - \frac{dY_V}{dt} \right), \\
 C_{3np}(Y_{IV} - Y_V) + \beta_{3np} \left(\frac{dY_{IV}}{dt} - \frac{dY_V}{dt} \right) &= C_{4np}(Y_V - Y_{VI}) + \beta_{4np} \left(\frac{dY_V}{dt} - \frac{dY_{VI}}{dt} \right), \\
 C_{4np}(Y_V - Y_{VI}) + \beta_{4np} \left(\frac{dY_V}{dt} - \frac{dY_{VI}}{dt} \right) &= C_{5np} Y_{VI} + \beta_{5np} \frac{dY_{VI}}{dt}.
 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В операторной форме эта система принимает вид

$$\left. \begin{aligned}
 F_{ГД}(p) &= C_5(T_{ГД}p + 1)Y_{ГД}(p), \\
 F_{ГД}(p) - m_{np} \left(\frac{Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)}{+ Y_4(p)} \right) p^2 - \beta_{11}^*(Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p))p &= C_f(T_f p + 1)Y_f(p), \\
 F_{ГД}(p) - m_{np} \left(\frac{Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)}{+ Y_4(p)} \right) p^2 - \beta_{11}^*(Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p))p &= C_1(T_1 p + 1)Y_1(p), \\
 F_{ГД}(p) - m_{np} \left(\frac{Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)}{+ Y_4(p)} \right) p^2 - \beta_{11}^*(Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p))p &= C_2(T_2 p + 1)Y_2(p), \\
 F_{ГД}(p) - m_{np} \left(\frac{Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)}{+ Y_4(p)} \right) p^2 - \beta_{11}^*(Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p))p &= C_3(T_3 p + 1)Y_3(p), \\
 F_{ГД}(p) - m_{np} \left(\frac{Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p)}{+ Y_4(p)} \right) p^2 - \beta_{11}^*(Y_f(p) + Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p))p &= C_4(T_4 p + 1)Y_4(p).
 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

На основании системы уравнений (8) можно построить структурную схему объекта управления заготовки с комплексом гидродомкратов по отношению к управляющему воздействию силы $F_{ГД}$, создаваемой

гидродомкратом (рисунок 6). Передаточная функция упругой системы объекта по отношению к управляющему воздействию силы $F_{ГД}$, создаваемой гидродомкратом, имеет вид:

$$W_{возм}(p) = \frac{Y_V(p)}{F_{ГД}(p)} = \frac{\left(\frac{1/C_f}{T_f p + 1} + \frac{1/C_{1np}}{T_1 p + 1} + \frac{1/C_{2np}}{T_2 p + 1} + \frac{1/C_{3np}}{T_3 p + 1} + \frac{1/C_{4np}}{T_4 p + 1} + \frac{1/C_{5np}}{T_5 p + 1} \right)}{1 + \left(\frac{1/C_f}{T_f p + 1} + \frac{1/C_{1np}}{T_1 p + 1} + \frac{1/C_{2np}}{T_2 p + 1} + \frac{1/C_{3np}}{T_3 p + 1} + \frac{1/C_{4np}}{T_4 p + 1} + \frac{1/C_{5np}}{T_5 p + 1} \right) (\beta_{11} p + m_{np} s^2)} + \frac{1/C_{11}}{T_{ГД} p + 1} \quad (9)$$

где $Y_V(p)$ – перемещение V точки в операторной форме.

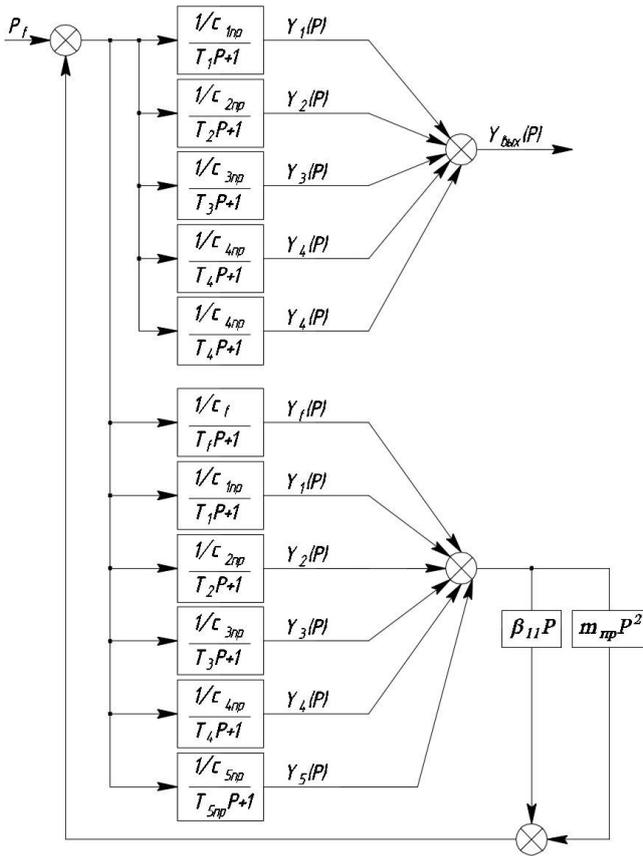


Рис. 4. Структурная схема объекта управления с комплексом гидроцилиндров по отношению к возмущающему воздействию

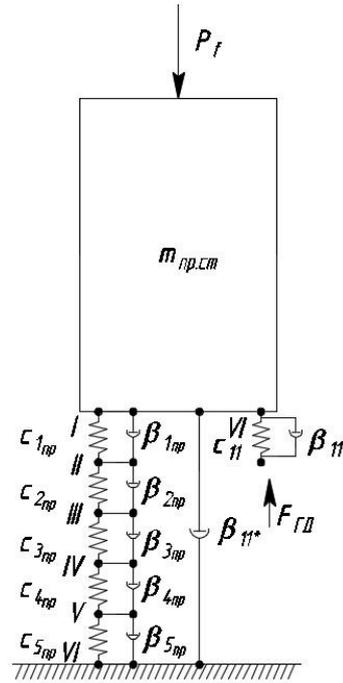


Рис. 5. Динамическая модель объекта регулирования при действии силы $F_{ГД}$ развиваемой гидродомкратом

Выполнив необходимые преобразования, выражение (9) можно представить в виде

$$W_{VC}(p) = \frac{Y_V(p)}{F_{ГД}(p)} = \frac{1}{C_{11}} \frac{(T_{5f}^5 p^5 + T_{4f}^4 p^4 + T_{3f}^3 p^3 + T_{2f}^2 p^2 + T_{1f} p + 1) \beta_f (T_{ГД} p + 1) (T_{5Y}^5 p^5 + T_{4Y}^4 p^4 + T_{3Y}^3 p^3 + T_{2Y}^2 p^2 + T_{1Y} p + 1)}{(T_{ГД} p + 1) (T_{5f}^5 p^5 + T_{4f}^4 p^4 + T_{3f}^3 p^3 + T_{2f}^2 p^2 + T_{1f} p + 1)}. \quad (10)$$

Здесь $\beta_f = 1/C_{1np} + 1/C_{2np} + 1/C_{3np} + 1/C_{4np}$ – коэффициент передачи.

На основании методики [18] найдем уравнения движения объекта по отношению к управляющему воздействию – давлению рабочей жидкости, подаваемой в гидродомкрат:

$$\begin{aligned} Y_{VI}(p) &= \frac{1}{S_{эф} p} \cdot \frac{P(p)e^{-\tau s} - P_{ГД}(p)}{R_{Г}}, \\ F_{ГД}(p) &= S_{эф} P_{ГД}(p), \\ W_{VC}(p) &= \frac{Y_V(p)}{F_{ГД}(p)}, \\ Y_{вых}(p) &= Y_1(p) + Y_2(p) + Y_3(p) + Y_4(p) + \\ &+ Y_5(p) = F_{ГД}(p) + Y_f(p). \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $P_{ГД}$ – давление рабочей жидкости в гидродомкрате [18];

$R_f = R_{ГР} + R_{ТР}$ – суммарное гидравлическое сопротивление,

где $R_{ГР}$ – сопротивление гидропреобразователя;

$R_{ТР}$ – сопротивление трубопроводов;

$S_{эф}$ – эффективная площадь мембраны [19–21].

Структурная схема одного канала объекта по отношению к управляющему воздействию представлена на рисунке 7.

$$\begin{aligned} W_0(p) &= \\ &= \frac{1}{1 + \left(\frac{1/C_f}{T_f p + 1} + \frac{1/C_{1np}}{T_1 p + 1} + \frac{1/C_{2np}}{T_2 p + 1} + \frac{1/C_{3np}}{T_3 p + 1} + \frac{1/C_{4np}}{T_4 p + 1} + \frac{1/C_{5np}}{T_5 p + 1} \right)} \cdot \frac{1}{(\beta_{11} p + m_{np} p^2)} \end{aligned} \quad (12)$$

Преобразуя выражение (12), получим

$$W_o(p) = \frac{T_5^5 p^5 + T_4^4 p^4 + T_3^3 p^3 + T_2^2 p^2 + T_1^{**} p + 1}{T_5^5 p^5 + T_4^4 p^4 + T_3^3 p^3 + T_2^{*2} p^2 + T_1^* p + 1}, \quad (13)$$

где $T_1^{**} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5$.

Тогда можно найти передаточную функцию объекта по управлению

$$W_Y(p) = \frac{Y_{\text{вых}}(p)}{P(p)} = \frac{\frac{1}{R_f S_{\text{эф}}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + K_c \cdot S_{\text{эф}} \cdot \frac{1}{W_{\text{YC}}(p)}}}{1 + \frac{1}{R_f S_{\text{эф}}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{1 + K_c \cdot S_{\text{эф}} \cdot \frac{1}{W_{\text{YC}}(p)}} \cdot \frac{1}{S_{\text{эф}}} \cdot \frac{1}{W_{\text{YC}}(p)}} \cdot \left(1 + \frac{1}{W_{\text{YC}}(p)} \cdot \frac{1}{T_{\text{ГД}} p + 1} \cdot \frac{1}{T_f p + 1} \cdot W_o(p) \right), \quad (14)$$

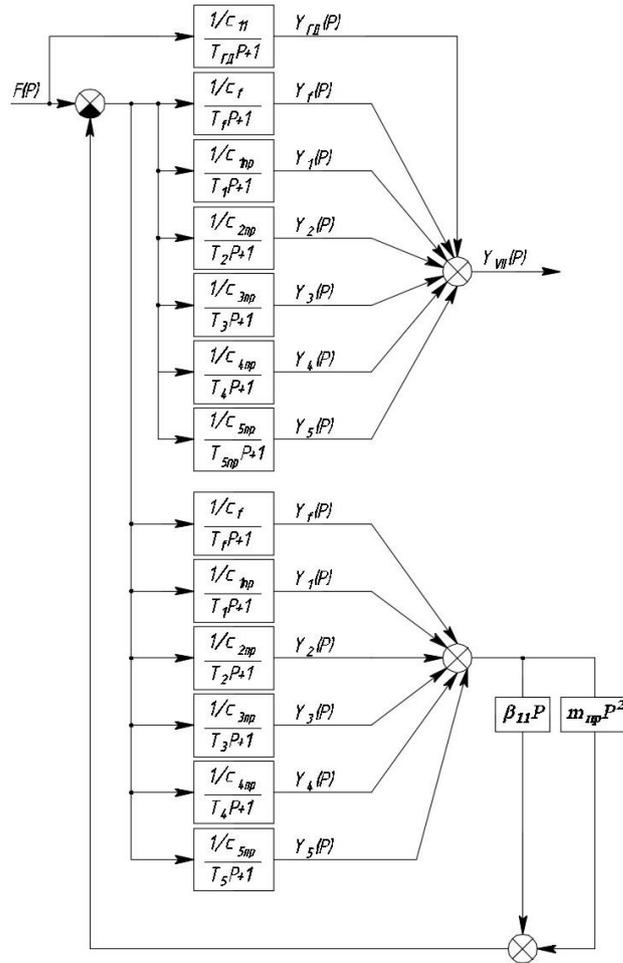


Рис. 6. Структурная схема объекта управления стойки с комплексом гидродомкратов при действии силы $F_{ГД}$

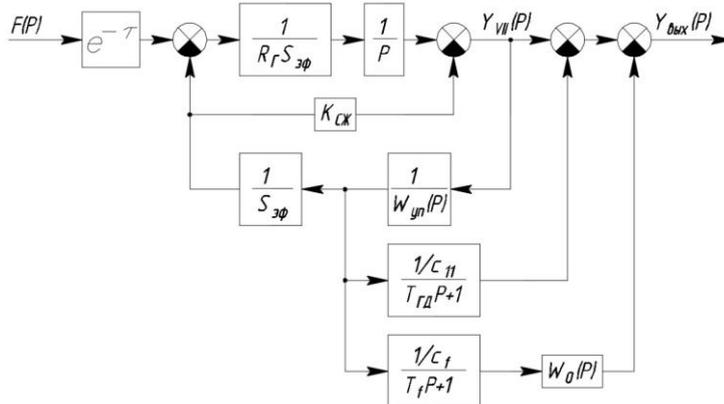


Рис. 7. Структурная схема каналов по управлению

где $W_{yc}(p)$ – передаточная функция упругой системы, определяемая из выражения (11).

Таким образом, разработана динамическая модель стойки горизонтального КРС и найдены аналитические зависимости, позволяющие найти передаточные функции по отношению к управляющему и возмущающему воздействиям. На основе данной работы появляется возможность синтезировать систему статической настройки технологической системы станка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горшков Б.М. Повышение точности координатно-расточных станков путем автоматического управления элементами упругих систем // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 7. С. 26–29.
2. Горшков Б.М. Повышение точности технологических систем с составными станинами методом автоматической компенсации их деформаций : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Тольятти, 2005. 35 с.
3. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.
4. Базров Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
5. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. Кн. 1. Технология машиностроения. М.: Машиностроение, 1982. 203 с.
6. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. Кн. 2. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1982. 367 с.
7. Васильев Г.Н., Ягопольский А.Г., Тремасов А.П. Проблемы диагностики и обеспечение надежности металлорежущих станков // СТИН. 2003. № 7. С. 14–17.
8. Основы технологии машиностроения. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 564 с.
9. Заковоротный В.Л., Панов Е.Ю., Христофорова В.В., Лукьянов А.Д., Флек М.Б. Определение оптимальных аттракторов формообразующих движений при обработке глубоких отверстий малого диаметра // СТИН. 2006. № 1. С. 2–7.
10. Каганов В.С. Математическое моделирование несущей системы станков // СТИН. 2003. № 3. С. 6–10.
11. Каминская В.В., Левина З.М., Решетов Д.Н. Станины и корпусные детали металлорежущих станков (расчет и конструирование). М.: Машгиз, 1981. 363 с.
12. Кирилин Ю.В., Табаков В.П., Еремин Н.В. Методика моделирования несущей системы станка // СТИН. 2004. № 6. С. 13–17.
13. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
14. Лысов В.Е. Теория автоматического управления. Специальные методы анализа линейных систем. Самара: СГТУ, 1999. 152 с.
15. Лысов В.Е. Основы синтеза систем адаптивного обеспечения точности несущих элементов прецизионных станков : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 1991. 32 с.
16. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. Л.: Машиностроение, 1970. 320 с.
17. Косов М.Г., Кутин А.А., Саакян Р.В., Червяков Н.М. Моделирование точности при проектировании технологических машин. М.: СТАНКИН, 1998. 102 с.
18. Никитин Б.В. Расчет динамических характеристик станков. М.: Машгиз, 1962. 110 с.
19. Бржозовский Б.М. Обеспечение точности обработки на автоматизированных металлорежущих станках. Обзорная информация. М.: ВНИИТЭМР, 1992. 48 с.
20. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем. Ч. 1. Проектирование металлорежущих станков / под общ. ред. А.С. Проникова. М.: Машиностроение, 1994. 443 с.
21. Салабаев Д.Е. Повышение точности при сверлении отверстий путем динамической настройки технологической системы : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тольятти, 2005. 19 с.

REFERENCES

1. Gorshkov B.M. Improvement of accuracy of multi-axis boring machines by means of automated control of elastic systems elements. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tekhnologii*, 2003, no. 7, pp. 26–29.
2. Gorshkov B.M. *Povyshenie tochnosti tekhnologicheskikh obrabatyvayushchikh sistem s sostavnymi staninami metodom avtomaticheskoy kompensatsii ikh deformatsiy*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [The improvement of composite housing processing systems accuracy using the method of automated compensation of their deformations]. Togliatti, 2005. 35 p.
3. Bazrov B.M. *Tekhnologicheskie osnovy proektirovaniya samopodnastraivayushchikhsya stankov* [Basic techniques of designing of self-tuning machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 216 p.
4. Bazrov B.M. *Raschet tochnosti mashin na EVM* [Machine accuracy calculation using computer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 256 p.
5. Balakshin B.S. *Teoriya i praktika tekhnologii mashinostroeniya. Kn. 1. Tekhnologiya mashinostroeniya* [Theory and practice of mechanical engineering. Book 1. Mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 203 p.
6. Balakshin B.S. *Teoriya i praktika tekhnologii mashinostroeniya. Kn. 2. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Theory and practice of mechanical engineering. Book 2. Principles of mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 367 p.
7. Vasilyev G.N., Yagopolsky A.G., Tremasov A.P. Issues of diagnostics and reliability control of metal cutting machines. *STIN*, 2003, no. 7, pp. 14–17.
8. Dalsky A.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya. V 2 t.* [Principles of mechanical engineering. 2 vols.]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 1997. 564 p.
9. Zakovorotnyi V.L., Panov E.Yu., Khristoforova V.V., Luk'yanov A.D., Flek M.B. Determining the optimal attractors of shaping motions in drilling deep holes of small diameter. *Russian engineering research*, 2006, vol. 86, no. 1, pp. 47–54.
10. Kaganov V.S. Mathematical modeling of carrying system of machines. *STIN*, 2003, no. 3, pp. 6–10.
11. Kaminskaya V.V., Levina Z.M., Reshetov D.N. *Staniny i korpusnye detali metallorazhushchikh stankov (raschet i konstruirovaniye)* [Frame works and body parts of

- metal cutting machines (calculation and designing)]. Moscow, Mashgiz Publ., 1981. 363 p.
12. Kirilin Yu.V., Tabakov V.P., Eremin N.V. Methods of modeling of machine carrying system. *STIN*, 2004, no. 6, pp. 13–17.
 13. Kudinov V.A. *Dimanika stankov* [Machine dynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.
 14. Lysov V.E. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Spetsialnye metody analiza lineynykh sistem* [Theory of automated control. Special methods of analysis of linear systems]. Samara, SGTU Publ., 1999. 152 p.
 15. Lysov V.E. *Osnovy sinteza sistem adaptivnogo obespecheniya tochnosti nesushchikh elementov pretsionnykh stankov*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Principles of synthesis of systems of adapting provision of accuracy of carrying elements of precision machine tools]. Samara, 1991. 32 p.
 16. Matalin A.A. *Tochnost' mekhanicheskoy obrabotki i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov* [Mechanical processing accuracy and technological processes designing]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1970. 320 p.
 17. Kosov M.G., Kutin A.A., Saakyan R.V., Chervyakov N.M. *Modelirovanie tochnosti pri proektirovanii tekhnologicheskikh mashin* [Modeling of accuracy during production machines designing]. Moscow, STANKIN Publ., 1998. 102 p.
 18. Nikitin B.V. *Raschet dinamicheskikh kharakteristik stankov* [Calculation of dynamic characteristics of machine tools]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 110 p.
 19. Brzhozovsky B.M. *Obespechenie tochnosti obrabotki na avtomatizirovannykh metallozhushchikh stankakh. Obzornaya informatsiya* [Assurance of accuracy of processing on automated metal cutting machines. Survey information]. Moscow, VNIITEMP Publ., 1992. 48 p.
 20. Pronikov A.S., ed. *Proektirovanie metallozhushchikh stankov i stanochnykh sistem. Ch. 1. Proektirovanie metallozhushchikh stanov* [Designing of metal cutting machines and machine systems. P.1. Designing of metal cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1994. 443 p.
 21. Salabaev D.E. *Povyshenie tochnosti pri sverlenii otverstiy putem dinamicheskoy nastroyki tekhnologicheskoy sistemy*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Accuracy improvement during drilling by means of dynamic setting of technological system]. Togliatti, 2005. 19 p.

THE DEVELOPMENT OF DYNAMIC MODEL OF THE COLUMN OF HORIZONTAL MULTI-AXIS BORING MACHINE WITH HYDRAULIC JACKS COMPLEX AS THE CONTROL TARGET

© 2016

M.A. Rubtsov, postgraduate student of Chair “Service of technical and technological systems”
Volga Region State University of Service, Togliatti (Russia)

Keywords: horizontal multi-axis boring machine; strength deformations; dynamic model; control target; hydraulic jack; static setting.

Abstract: Metal cutting equipment is one of the basics of machine building production. Horizontal multi-axis boring machines used in machine building allow processing workpieces of various sizes and complexity with high accuracy and high efficiency. In this case, the accuracy of treatment depends on many factors but the basis is the geometrical accuracy of processing equipment itself. Machine accuracy affects its working ability, durability, efficiency, productivity, noise and vibration level and the quality of the goods produced. Strength bending and torsional deformations of stands of horizontal multi-axis boring machines occurring when moving the machine column along the stand cause the decentration of the processed bores, for example, during the boring. The author suggests installing of two executive elements of vertical displacements in conjunction between the slide assembly and the column bed of the machine. Hydraulic jacks are the example of such executive elements. Machine column with the hydraulic jacks' complex serves as the control target. When changing the working liquid pressure in them, the motion of column leading end occurs. The paper presents the design of the dynamic model of the column with hydraulic jacks' complex of the horizontal multi-axis boring machine, the stand of which is subject to the strength bending and torsional deformations. 2A459AF4 model machine became the study object. The author considered the reactions in the points of hydraulic jacks' installment and determined the analytical expressions on which basis the block schemes of control target with the hydraulic jacks' complex in relation to perturbation action and control channels were built. The object transfer function against the perturbation and control actions that allows producing the system of the static setting of processing system of multi-axis boring machines was determined.