

## РАЗРАБОТКА ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ И ЗАГОРОМ

*Жолудева Н. С.*

*Кыргызский государственный технический университет  
им. И.Раззакова, Бишкек, Кыргызская Республика*

*В работе рассматривается схема и математическая модель двухконтурной системы автоматического управления режимами работ.*

*In this paper the mathematical model of the scheme and two-contour system of automatic control mode of operation.*

Точение в машиностроительном производстве является одним из самых применяемых процессов обработки металлов резанием.

Для получения высокой точности размеров деталей и высокой чистоты обрабатываемой поверхности необходимо, чтобы подача и упругое перемещение резца ( $\delta$ ) была постоянно независима от нагрузки. В связи с тем, что нагрузка при механической обработке каждый момент времени меняется по причинам: 1) различия твердости материалов по длине обработки; 2) колебания припуска; 3) износа инструмента; 4) переменной силы сопротивления при перемещении суппорта.

Цель достигается путем создания двухконтурной автоматической системы управления выше названными параметрами. Данная автоматическая система применяется при проектировании высокоточных станков, предназначенных для чистовой обработки изделий в машиностроении.

Конструкция, приведённая на рис.1, состоит из станины (опоры) 1, на которой установлен суппорт станка с гидроцилиндром 2. На суппорте станка установлен режущий инструмент 3, также на нём установлен индуктивный датчик 4, который соединён с двумя электрическими усилителями У1 и У2. Выход каждого усилителя стыкуется со своим электромагнитным двигателем ЭМ1 и ЭМ2, якоря которых связаны с регуляторами расхода. Выход каждого регулятора подключен к своему потребителю, т.е. к гидроцилиндру и гидростатической опоре, благодаря редуционным клапанам РК перепад давления на регуляторах расхода является постоянным. Преобразователь частоты 10 предназначен для регулирования частоты колебания золотника дискретного регулятора расхода.

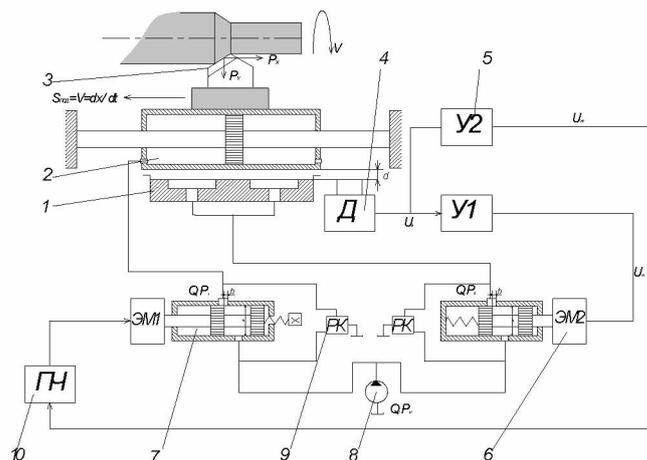


Рис.1. Принципиальная схема двухконтурной системы автоматического управления скоростью и зазором.

Работа автоматики основана на принципе обратной связи. Изменение зазора в гидростатических направляющих вызывает изменение выходного сигнала индуктивного датчика. Сигнал от датчика поступает на вход усилителей У1 и У2. Усиленные сигналы соответственно идут к электромагниту ЭМ1, который управляет величиной открытия щели  $h$  регулятора расхода в силовой цилиндр и электромагниту ЭМ2, преобразователю частоты, регулирующему частоту колебания регулятора расхода для гидростатических направляющих.

При увеличении силы резания уменьшается скорость подачи инструмента, и зазор в гидростатических направляющих для восстановления их заданных значений подается в соответствующие силовые органы дополнительный расход путем увеличения величины открытия щелей  $h$  и частоты колебания регуляторов. Увеличение или уменьшение расхода в рабочие органы приводит к уменьшению погрешностей, возникаемых в процессе обработки.

**Усилитель постоянного тока**

В системе мощность сигнала, поступающая от датчика, порой становится недостаточной, становится необходимым установление промежуточного устройства для усиления сигнала. В данной работе применён электронный усилитель, у которого коэффициент усиления  $K_u$ . Очевидно, что выходной параметр данного звена будет зависит прямо пропорционально входному звену, т.е. линейно. Усилитель постоянного тока в виду своей безинерционности принимается идеальным.

Матмодель звена

$$U(\Delta U) = K_u \cdot \Delta U \tag{1}$$

Передаточное отношение  $W(p) = K_u$

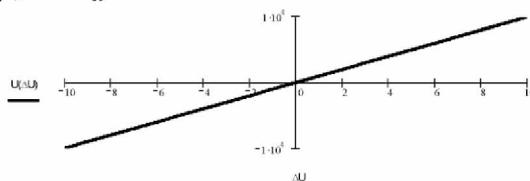


Рис.2 График изменения напряжения.

Переходная функция  $h(t) = K_u$

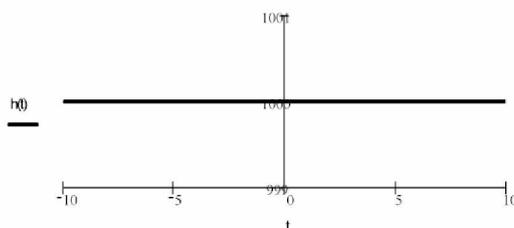


Рис.3 График переходной функции.

### Электромагнит 1

Электромеханический преобразователь воспринимает электрический сигнал и преобразует его в линейное или угловое перемещение якоря, связанного с золотником, заслонкой или струйной трубкой (для нашего случая - якоря). Электромагнит является аperiodическим звеном первого порядка, на что указывает следующее уравнение:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot r = U \tag{2}$$

$L$  – индуктивность;

$r := 150\Omega$  – сопротивление обмотки;

$T_k := \frac{L_k}{r}$  – постоянная времени;

$K_k := \frac{1}{r}$  – коэффициент усиления;

$U$  – напряжение, подаваемое с усилителя (напряжение изменения зазора).

Матемодель звена

$$i(t) = K_k \cdot U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_k}}) \tag{3}$$

Передаточное отношение

$$W(p) = \frac{K_k}{T_k \cdot p + 1}$$

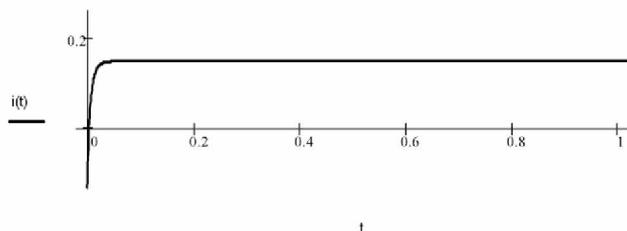


Рис.4 График тока катушки.

### Электромагнит 2

Электромагнит является аperiodическим звеном первого порядка, на что указывает следующее уравнение:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot r = U$$

Матемодель звена

$$i(t) = K_k \cdot U \cdot \cos(\omega \cdot t) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_k}})$$

Передаточное отношение

$$W(p) = \frac{K_k}{T_k \cdot p + 1}$$

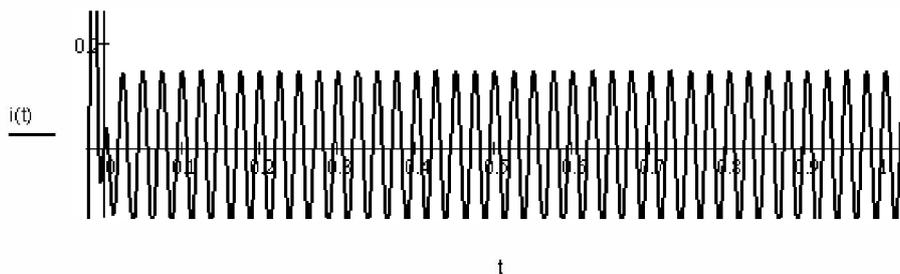


Рис.6 График тока катушки.

### Регулятор расхода масла 1

В системе стабилизации зазора использован регулятор золотникового типа, имеющий пропускную щель с острыми краями, поскольку в нём зависимость расхода масла от величины открытия пропускной щели практически линейна, что удобно для использования в системах автоматики.

Уравнение динамического равновесия золотника регулятора расхода имеет вид:

$$M \frac{dh_p^2}{dt^2} + F_V + F_{уп} + F_{гид} = Fe, \tag{4}$$

где  $M$  – масса якоря и золотника;

$F_V$  – сила вязкого трения между золотником и корпусом регулятора.

$$F_V = 6\pi \eta R V,$$

где  $R$  – радиус золотника;

$V$  – скорость движения золотника (или того же, якоря ЭМ), в данном случае,

$$V = 0,1 \dots 0,5 \text{ м/с}$$

$\eta = 0,01 \text{ Па}\cdot\text{с}$  – динамическая вязкость масла;

$F_{уп}$  – сила упругости пружины регулятора,

$$F_{уп} = c \cdot h_p$$

$F_{гид}$  – гидравлическая сила потока масла, проходящего через регулятор,

$$F_{гид} = 2\mu \cdot x \cdot h_p \cdot \Delta p \cdot \cos 69^0,$$

где  $\mu = 0,65$  – коэффициент расхода;

$x$  – периметр пропускной щели, в данном случае:

$$x = \pi \cdot d,$$

$d$  – диаметр пропускной щели.

Подставляя вышеуказанные формулы в уравнение равновесия, получим:

$$M \frac{dh_p^2}{dt^2} + 6\pi\eta \cdot R \cdot V + ch_p + 2\mu \cdot x h_p \cdot \Delta p \cos 69^0 = Fe,$$

Так как вид переходного процесса сильно зависит от параметра  $\xi$  (динамическая вязкость), то для сравнения можно рассмотреть эти случаи, их три:

первое, когда  $0 < \xi < 1$  уравнение является колебательным затухающим,

второе, когда  $0 = \xi < 1$  звено является консервативным, или, ещё её называют частным случаем, уравнение колебательное не затухающее,

Уравнение или матмодель

$$Tz^2 + p^2 + 2 \cdot \zeta \cdot Tz \cdot p + 1 = K_z \cdot Fe$$

Передаточное отношение

$$W(p) = \frac{K_z}{Tz^2 + p^2 + 2 \cdot \zeta \cdot Tz \cdot p + 1}$$

**Первый случай ( $0 < \xi < 1$ )**

Динамическая вязкость  $\zeta = 0,3$

Уравнение движения оси регулятора

$$m_1(t) = K_z \cdot Fe \cdot \left[ 1 - e^{-\gamma t} \cdot (\cos(\lambda \cdot t) + \frac{\gamma}{\lambda} \cdot \sin(\lambda \cdot t)) \right] \tag{5}$$

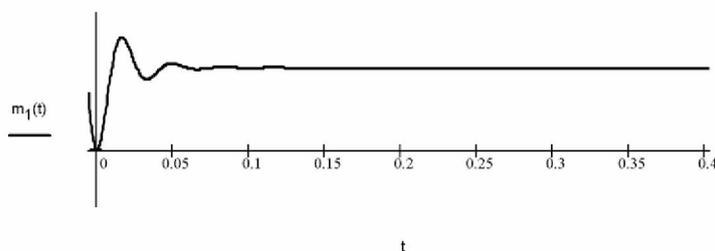


Рис.7 График движения оси.

$$h(t) = K_z \cdot \left[ 1 - e^{-\gamma t} \cdot (\cos(\lambda \cdot t) + \frac{\gamma}{\lambda} \cdot \sin(\lambda \cdot t)) \right]$$

График переходной функции

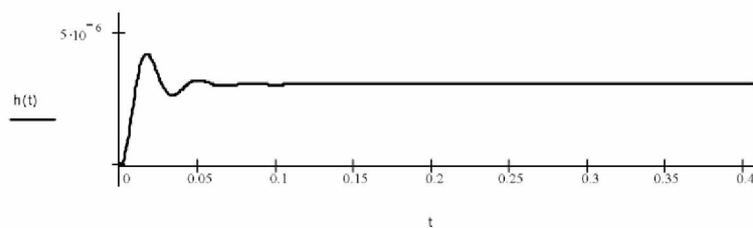


Рис.8 График переходной функции.

**Второй случай ( $0 = \zeta < 1$ )**

Динамическая вязкость  $\zeta = 0$   
 Передаточное отношение изменится

$$W(p) = \frac{K_z}{Tz^2 \cdot p + 1}$$

График движения оси

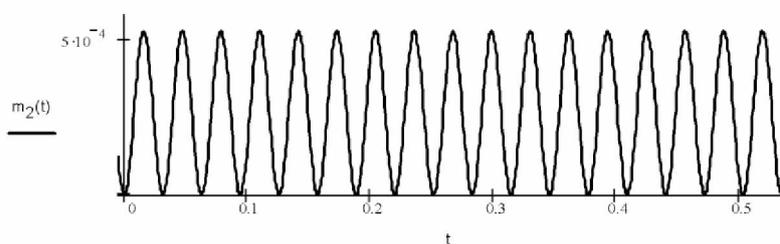


Рис.9 График движения оси.

Переходная функция  $h(t) = K_z \cdot [1 - (\cos(q \cdot t))]$

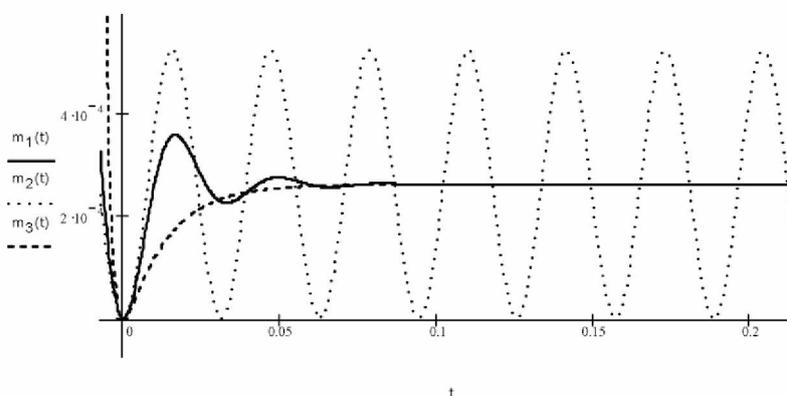
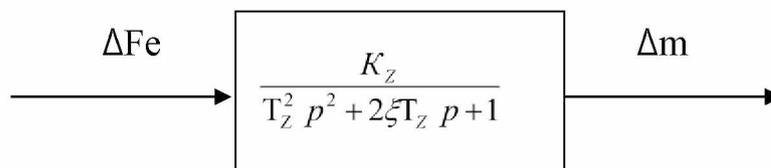


Рис.10 График сравнения по движению.



**Данные регулятора расхода масла2**

Уравнение или матмодель  $(Tz^2 + p^2 + 2 \cdot \zeta \cdot Tz \cdot p + 1) \cdot m = K_z \cdot Fe \cdot \cos(\omega \cdot t)$   
 Передаточное отношение

$$W(p) = \frac{K_z}{Tz^2 + p^2 + 2 \cdot \zeta \cdot Tz \cdot p + 1}$$

**Первый случай ( $0 < \zeta < 1$ )**

Динамическая вязкость  $\zeta = 0,3$   
 Уравнение движения оси регулятора

$$m_1(t) = K_z \cdot F e \cdot \cos(\omega \cdot t) \left[ 1 - e^{-\gamma t} \cdot (\cos(\lambda \cdot t) + \frac{\gamma}{\lambda} \cdot \sin(\lambda \cdot t)) \right]$$

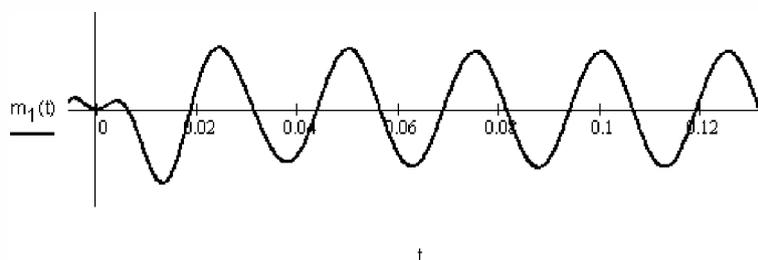


Рис.11 График движения оси.

Переходная функция

$$h(t) = K_z \cdot \left[ 1 - e^{-\gamma t} \cdot (\cos(\lambda \cdot t) + \frac{\gamma}{\lambda} \cdot \sin(\lambda \cdot t)) \right]$$

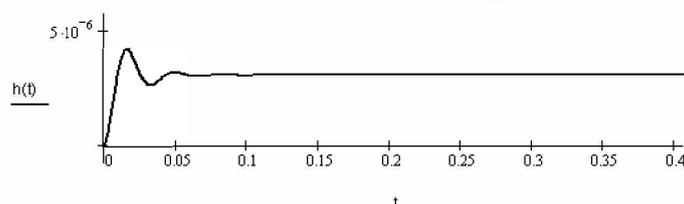
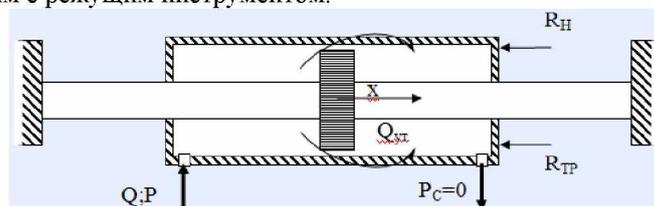


Рис.12 График переходной функции.

### Силовой гидроцилиндр

Гидравлический цилиндр предназначен для перемещения (т.е. подачи) гидростатической опоры, на котором установлен зажим с режущим инструментом.



Составим уравнение равновесия силового гидроцилиндра по принципу Даламбера

$$p_1 F = M \frac{d^2 x}{dt^2} + R_{рез}, \tag{6}$$

где  $p_1$  – рабочее давление;  
 $F$  – рабочая площадь силового гидроцилиндра,

$$F = \frac{\pi d_1^0}{4} - \frac{\pi d_2^2}{4} = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2),$$

$d_1$  и  $d_2$  - диаметры цилиндра и плунжера.

$M$  – масса подвижной части;

$R_f = P_x$  – составляющая силы резания направленная вдоль оси  $x$ .

Уравнение неразрывности потока рабочей жидкости

$$Q = F \frac{dx}{dt} + k_U P_1, \tag{7}$$

где  $Q$  – расход масла в гидроцилиндре;

$k_U$  – коэффициент утечек в гидроцилиндре.

Выражение  $k_U P_1 = Q_{ум}$  – потери в гидроцилиндре.

Решая совместно уравнение неразрывности и уравнение равновесия, и поделив правую и левую часть на  $F$ , получим:

$$\frac{M \cdot ku}{Fc^2} \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + \frac{Rr + Rt}{Fc^2} \cdot ku = \frac{Q}{Fc}$$

или

$$Tc \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + \alpha = Vo$$

А так как регулируемый параметр скорость перемещения, то

$$(Tc \cdot p + 1) \cdot Vc = Vo - \alpha$$

**Для системы без регулирования**

Действие по управлению  $Vc1u(t) = Qz \cdot Kc \cdot (1 - e^{-\frac{t}{Tk}})$

Действие по возмущению  $Vc1u(t) = -\alpha \cdot Kc \cdot (1 - e^{-\frac{t}{Tk}})$

Общее решение  $Vc1(t) = (Qz - \alpha) \cdot Kc \cdot (1 - e^{-\frac{t}{Tk}})$  (8)

Передаточное отношение по управлению

$$W(p) = \frac{Kc}{Tc \cdot p + 1}$$

Передаточное отношение по возмущению

$$W(p) = \frac{-Kc}{Tc \cdot p + 1}$$

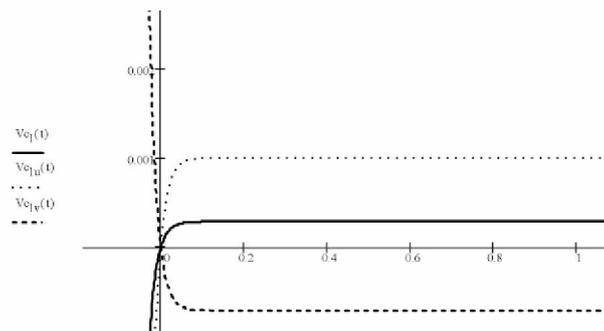


Рис.13 График изменения скорости.

**Для системы с регулированием**

Действие по управлению  $Vc1u(t) = Q \cdot Kc \cdot (1 - e^{-\frac{t}{Tk}})$

Действие по возмущению  $Vc1u(t) = -\alpha \cdot Kc \cdot (1 - e^{-\frac{t}{Tk}})$

Общее решение  $Vc1(t) = (Q - \alpha) \cdot Kc \cdot (1 - e^{-\frac{t}{Tk}})$  (9)

Передаточное отношение по управлению

$$W(p) = \frac{Kc}{Tc \cdot p + 1}$$

Передаточное отношение по возмущению

$$W(p) = \frac{-Kc}{Tc \cdot p + 1}$$

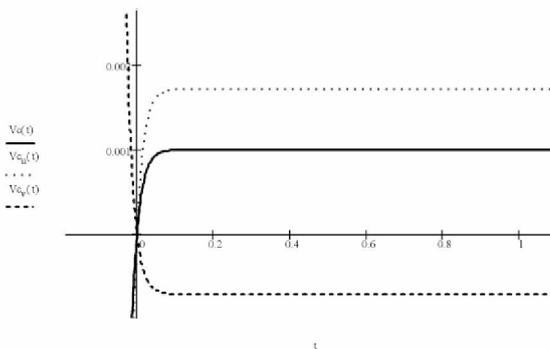


Рис.14 График изменения скорости.

Переходная функция  $h(t) = K_c \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_k}})$

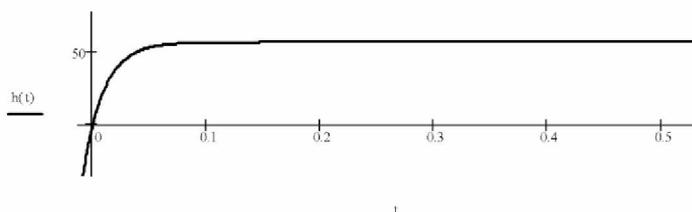
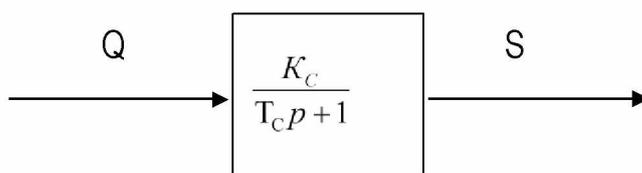


Рис.15 График переходной функции.

Схема звена на чертеже



**Вывод:**

Разработана принципиальная схема двухконтурной системы автоматического управления скоростью и зазором, позволяющая произвести расчёт основные массово – геометрические и режимных параметров системы. Составлены математические модели элементов системы автоматического управления.

Преимущества предлагаемой двухконтурной автоматической системы управления скоростью и величиной зазора:

1. универсальность схемы, т.е. возможность ее применения к любым станкам;
2. повышенная точность и чистота обрабатываемой поверхности;
3. повышается производительность оборудования за счет уменьшения количества операций.

**Литература**

1. Ачеркан Н. С., Гаврюшин А. А., Ермаков В. В. и др. Металлорежущие станки. – М.: Машиностроение, 1965.
2. Теория машин - автоматов и пневмогидроприводов. Сборник статей / Под. ред. Л. В. Петрокаса. – М.: Машиностроение, 1970.
3. Ю. И. Чупраков. Основы гидро- и пневмоприводов. – М.: Машиностроение, 1966.
4. Герц Е. В. Расчёт и проектирование гидравлических систем машин автоматов. – М.: Машиностроение, 1966.

УДК.: 62-23:621.3.082.22

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ИНДУКТИВНЫЙ ДАТЧИК, ПРИМЕНЯЕМЫЙ В ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ И ЗАГОРОМ

Жолудева Н. С.

Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,  
Бишкек, Кыргызская Республика

В работе рассматривается схема и математическая модель датчика применяемого в двухконтурной системе автоматического управления режимами работ.

In this paper the mathematical model of the scheme and the sensor used in the two-contour system of automatic control mode of operation.

Для контроля зазора гидростатической опоры  $h$  необходимо использовать датчики слежения за величиной этого параметра. В качестве такого датчика используется дифференциальный индуктивный датчик, который является позиционным безинерционным звеном.

Входным параметром является изменяемый под действием нагрузок зазор, образуемый гидравлической подушкой. В действительности же измеряется увод режущего инструмента от заданной траектории, который вместе с тем действует и на гидростатическую опору станка, но так, как станок предназначен для чистовых обработок, то деформация суппорта (ввиду ее малости) не учитывается, т.е. если считать, что отвод инструмента и изменение зазора в ГО под действием сил резания одинаковым, то упрощается конструктивное решение месторасположения датчика.

Зазор  $h$ , соответственно, увод инструмента обозначается через  $h$  и  $\delta$ , но в дальнейшем будет рассматриваться только изменение зазора.

Датчик состоит из корпуса 1, сердечника 2, набора магнитных втулок 7, двух крышек 3, индукционной катушки 5 и хомута 6. Основной частью индукционного датчика является постоянный магнит 7, собранный из втулок. Втулки сделаны из магнитного сплава и затем намагничены на специальной установке, полюсами магнитов служат сами втулки. Сердечник 2 состоит из металлического стержня, свободно перемещающегося внутри корпуса. Концентричное расположение оси сердечника с осью корпуса сохраняется при помощи крышек – втулок 3. Индукционная катушка 5 намотана на сердечник медной проволокой диаметром 0,2 мм, концы которой выходят через специальное отверстие 4, сделанное с правого торца сердечника и подключаются к измерительным приборам. Хомут 6 располагается также концентрично с корпусом датчика, и при помощи специального кронштейна служит для жесткого его скрепления с муфтой 3, соединяющей штоки гидроцилиндров. Между втулками 7 и сердечником 2 образуется кольцевой зазор, в котором перемещается индукционная катушка 5. При пересечении магнитных силовых линий витками обмотки этой катушки в них возникает электродвижущая сила, пропорциональная скорости движения.

Все детали датчика монтируются в эбонитовой трубке – корпусе 1 и крепятся с его торцов гайками 3. Величину скорости можно вычислить по показаниям амперметра 5 и тарировочного графика датчика.

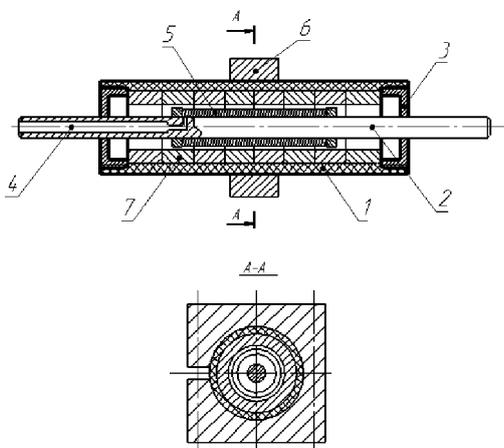


Рис.1 Индукционный датчик скорости

Технические характеристики датчика

Диапазон измерения, м/мин	0,03÷2
Число витков катушки возбуждения	600
Выходное напряжение, мВ	1÷100
Габаритные размеры:	
Длина, мм	1000
Диаметр корпуса, мм	60
Вес, кг	4,7

Принцип работы датчика: измерение величины зазора осуществляется щупом датчика, который жестко скреплен с якорем датчика, якорь, перемещаясь относительно неподвижного магнитопровода, определяет магнитное сопротивление цепи и индуктивность катушки. Связь перемещения якоря индуктивности с измеряемой величиной  $h$  при  $U = \text{const}$ :

$$L = f(h),$$

где  $L$  - индуктивность катушки.

Ток в обмотке определяют выражением

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}},$$

где  $I$  – ток на выходе датчика,  $U$  – напряжение,  $R$  – магнитное сопротивление сердечника,  $\omega$  – частота тока.

Индуктивные преобразователи с переменным зазором имеют высокую чувствительность и реагируют на изменение зазора порядка 0,1—0,5 мкм.

Чувствительность преобразователя

$$K_L = \frac{W^2 \mu S_0}{2h^2},$$

где  $W$  – число обмоток катушки,  $\mu = 4 \pi \cdot 10^{-9}$  гн/см – магнитная проницаемость материала сердечника,  $h$  – воздушный зазор,  $S_0$  – площади сечения воздушного зазора.

Диапазон измерений перемещений индуктивными преобразователями с переменным зазором 0,1—1 мм.

С увеличением зазоров зависимость  $L=f(h)$  становится весьма нелинейной. Для спрямления нелинейности в нашем случае используется преобразователь с двумя отдельными магнитными цепями и общим якорем, подключенного симметричной мостовой схемой. Зазор изменяется с одинаковым абсолютным значением, но различным по знаку. Такая схема подключения позволяет избавиться от помех питания, тепловых воздействий и получить относительно четкий сигнал, зависящий только от исследуемого параметра на выходе датчика.

Обмотки катушек включают в соседние плечи дифференциальной мостовой схемы. Образованную сравнительную систему объединяют с рабочей системой в единый дифференциальный преобразователь. Это объединение способствует повышению чувствительности в 2 раза, компенсации температурных погрешностей в нулевой точке, снижению усилий магнитного притяжения и спрямлению характеристики.

Для преобразователей с изменяющимся зазором

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -\frac{\Delta h}{h_0},$$

где  $h_0$  — начальное значение зазора  $\Delta h$  - изменение зазора. Линейная характеристика сохранится при

$$\frac{\Delta h}{h_0} = 0,15 - 0,2$$

Современные конструкции индуктивных дифференциальных преобразователей характеризуются нелинейностью, не превышающей 1%. Поэтому эти преобразователи широко применяют в различных приборах для линейных измерений.

Сила тока в обмотке преобразователя практически не меняется при изменении воздушного зазора, так как воздушный суммарный зазор и магнитное сопротивление остаются без изменения. Учитывая то, что работа датчика находится в линейной зоне, а его быстродействие велико в сравнении с гидравлическими, механическими узлами станка, то в определенной степени можно идеализировать математическую модель

датчика:

$$U(h) = k_d h \quad , \quad (1)$$

где  $k_d = \operatorname{tg} \alpha$

$$k_d = 300 \text{ В/м}$$

Передаточная функция датчика

$$W(p)_{\text{дат}} = \frac{\Delta U(p)}{\Delta h(p)} = k_d$$

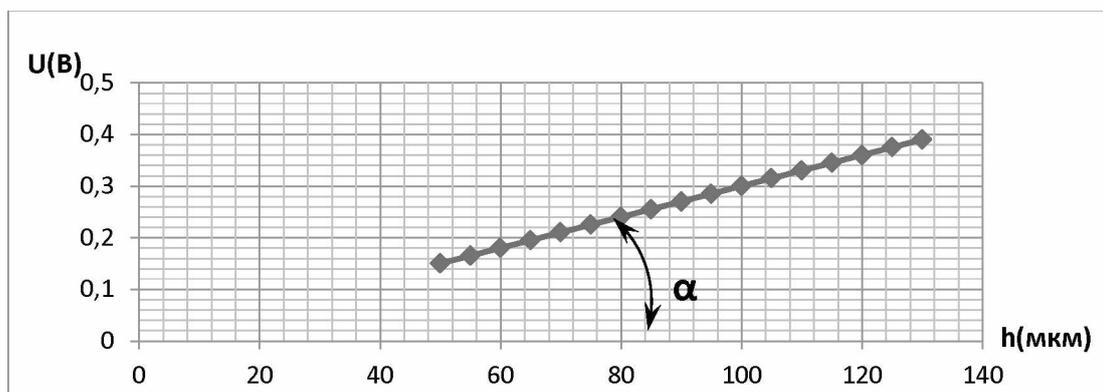


Рис. 1 График изменения напряжения от величины зазора дифференциального индуктивного датчика.

Вывод: Выбрана компоновка индуктивного датчика, построена математическая модель, а также предоставлены графики переходной функции и изменения напряжения от величины зазора.

#### Литература

1. Рубанов В. Г. Математические модели элементов систем управления: Учеб. пособие. - Харьков: Харьковский авиационный институт, 1980. – 92 с.
2. Активный контроль в машиностроении. Справочник / Под. ред. Е. И. Педь. - М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
3. Теория машин - автоматов и пневмогидроприводов. Сборник статей / Под. ред. Л. В. Петроаса. – М.: Машиностроение, 1970.

УДК.: 517.538.5:004.896

#### ОСОБЕННОСТИ ОКРЕСТНОСТИ ЧАСТОТЫ СРЕЗА НА ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ РАЗОМКНУТЫХ СИСТЕМ, РАБОТАЮЩИХ БЕЗ ПЕРЕРЕГУЛИРОВАНИЯ В ЗАМКНУТОМ РЕЖИМЕ

Кошоева Б. Б.

Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова,  
Бишкек, Кыргызская Республика  
E-mail: [bibigul200472@mail.ru](mailto:bibigul200472@mail.ru)

#### ESPECIALLY AROUND THE CUTOFF FREQUENCY OF THE FREQUENCY RESPONSE OF THE OPEN-LOOP SYSTEM THAT OPERATES WITHOUT OVERSHOOT IN THE CLOSED MODE

Koshoeva B.B.

Kyrgyz State Technical University named after Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic  
E-mail: [bibigul200472@mail.ru](mailto:bibigul200472@mail.ru)

Рассматривается задача аппроксимации промышленных объектов и основные требования к виду ЛАЧХ и ФЧХ разомкнутой системы в окрестности частоты среза  $\omega_{ср}$

Объекты промышленных систем и их модельное представление в составе одноконтурных систем. Обобщенная функциональная схема системы промышленной автоматизации изображена на рис.1.

датчика:

$$U(h) = k_d h \quad , \quad (1)$$

где  $k_d = \operatorname{tg} \alpha$

$$k_d = 300 \text{ В/м}$$

Передаточная функция датчика

$$W(p)_{\text{дат}} = \frac{\Delta U(p)}{\Delta h(p)} = k_d$$

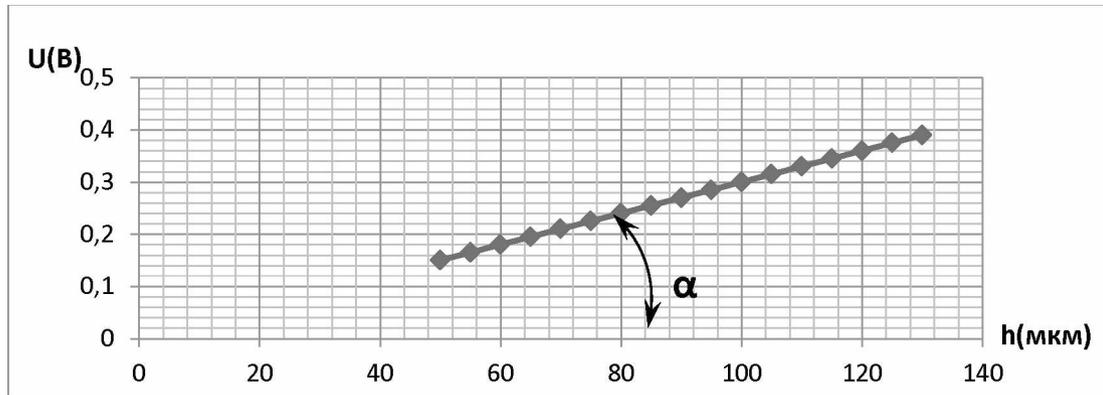


Рис. 1 График изменения напряжения от величины зазора дифференциального индуктивного датчика.

Вывод: Выбрана компоновка индуктивного датчика, построена математическая модель, а также предоставлены графики переходной функции и изменения напряжения от величины зазора.

### Литература

1. Рубанов В. Г. Математические модели элементов систем управления: Учеб. пособие. - Харьков: Харьковский авиационный институт, 1980. – 92 с.
2. Активный контроль в машиностроении. Справочник / Под. ред. Е. И. Педь. - М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.
3. Теория машин - автоматов и пневмогидроприводов. Сборник статей / Под. ред. Л. В. Петрокаса. – М.: Машиностроение, 1970.