© Ю.А. Мещерина, Е.В. Пугачев, 2008

УДК 622.232.83:681.516.3

Ю.А. Мещерина, Е.В. Пугачев

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

Создана уточненная модель объекта управления контура скорости подачи исполнительного органа проходческого комбайна, в которой управление гидроцилин-дром осуществляется от трехзвенного электрогидравлического преобразователя.

Проходческий комбайн является сложной динамической системой, исполнительный орган которого имеет автономные приводы резания и подачи, взаимодействующие через забой. На процесс формирования нагрузок в электроприводе резания оказывают влияния условия эксплуатации. Угольные пласты Кузбасса содержат нарушения, встречаются крепкие и вязкие угли, породные прослойки, твердые включения, которые снижают производительность и надежность проходческих комбайнов.

Определяющим фактором повышения производительности, долговечности и надежности проходческих комбайнов является уровень их автоматизации, который сравнительно низок и не соответствует передовым тенденциям развития систем регулирования и управления в России и за рубежом. Поэтому целью данной работы является создание микроконтроллерной системы стабилизации ординарных и ограничения экстремальных нагрузок стреловидного исполнительного органа проходческого комбайна.

При контакте исполнительного органа с твердым включением [1] процесс монотонного «стопорения» исполнительного органа нарастает за (0,3÷0,4) с. Следовательно, быстродействие системы стабилизации нагрузки должно составлять (0,2÷0,25) с с плавным без перерегулирования переходным процессом.

Предлагается микроконтроллерная система управления режимами работы стреловидного исполнительного органа проходческого комбайна с элек-трогидроприводом подачи и асинхронным короткозамкнутым нерегулируемым электродвигателем привода резания горной породы. В основу синтеза регуляторов тока и скорости подачи положен метод разнотемповых движений, который способен обеспечить построение системы с любыми наперед заданными характеристиками как медленных так и быстрых движений, способных обеспечить требуемое быстродействие и плавность переходных процессов.

Уточненная модель электрогидропривода подачи как объекта управления создана на основании обобщения материалов литературных источников с учетом особенностей современных электрогидравлических усилителей. Ее структурная схема приведена на рис. 1.

В состав объекта управления контура тока электродвигателя включен электрогидропривод подачи и асинхронный электродвигатель с управления контура тока является то, что возмущающее воздействие поступает со стороны

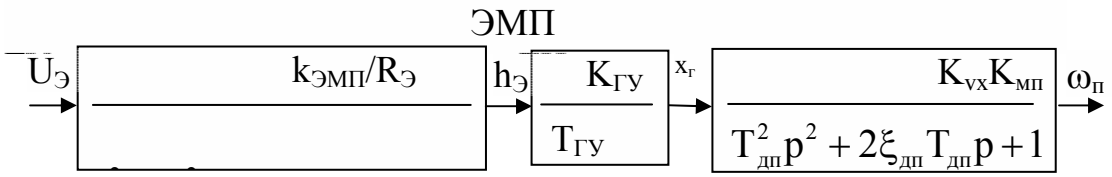

Рис. 1. Структурная схема объекта управления электрогидропривода подачи: ЭМП - электромеханический преобразователь; ГУ – гидравлический усилитель; ГЦ - гидроцилиндр

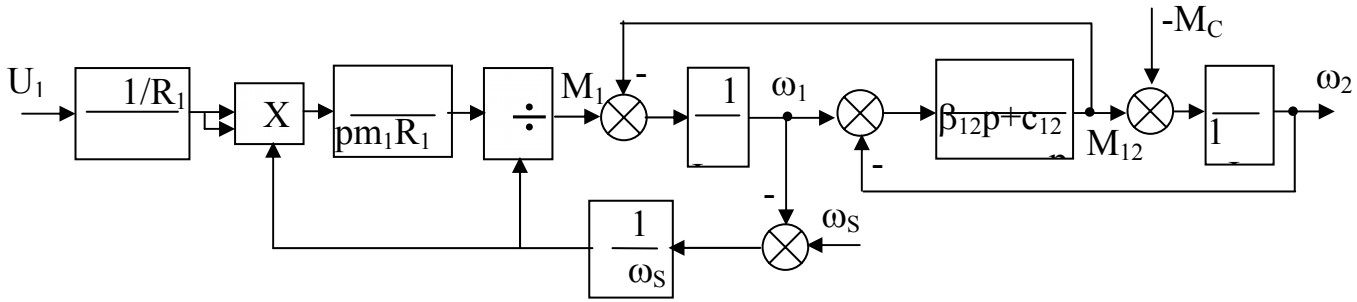

Рис. 2. Структурная схема модели двухмассового объекта управления «ротор асинхронного электродвигателя – исполнительный орган»

забоя в виде момента нагрузки M_C, определяемого изменением скорости подачи исполнительного органа. Изменение момента нагрузки приводит к изменению тока электродвигателя, величина которого стабилизируется за счет изменения скорости подачи исполнительного органа.

Как объект управления асинхронный электродвигатель является сложным трехфазным нелинейным звеном. Было целесообразно выполнить упрощение его модели, не теряя точности. Для этого выполнили суммирование магнитных потоков трех фаз обмоток статора электродвигателя с учетом их фазового сдвига во времени и пространстве [2]. Получили результирующий вращающийся в пространстве модуль магнитного потока, что дало возможность представить трехфазный электродвигатель эквивалентной однофазной моделью, причем учтена двухмассовость объекта управления:

Синтез регуляторов тока и скорости выполнили по методике, разработанной автором, и изложенной в работе [3]. Используется принцип разделения движений на медленные и быстрые, причем медленные движения определяют желаемые переходные и установившиеся движения системы, а быстрые движения обеспечивают физическую реализуемость регуляторов.

Систему управления строим многоконтурной, причем целью синтеза любого контура принимаем желаемую передаточную функцию второго порядка:

$$\frac{y(p)}{x(p)} = \frac{K}{T_P^2 p^2 + 2\xi T_P p + 1}, \quad (1)$$

Преимуществом функции (1) перед желаемыми передаточными функциями более высоких порядков является простая связь параметров объекта управления контура с параметрами регулятора и желаемыми процессами в системе. Процессы, описываемые (1), являются медленными движениями. Задаваясь постоянной времени T_P и коэффициентом демпфирования ξ характеристического полинома передаточной функции (1), можно получить любое, допускаемое ограниченными параметрами объекта и преобразователей, быстродействие и перерегулирование, а также плавные и быстрые процессы без перерегулирования. Поскольку желаемая передаточная функция используется для любого внутреннего или внешнего контура, быстродействие и перерегулирование всех контуров, в отличие от систем подчиненного регулирования, получается одинаковым. Быстродействие многоконтурной системы существенно возрастает.

Структурная схема созданной системы управления приведена на рисунке 4, причем полная модель объекта управления в составе контура скорости подачи показана на рисунке 5. Аналоговые передаточные функции регуляторов скорости подачи и тока электродвигателя, полученные по методике, изложенной автором в работе [3], имеют соответственно вид:

$$W_{PC}(p) = \frac{\gamma(p)}{D_{PT}(p)} = \frac{T_{ГУ} T_{дп}^2 p^3 + T_{дп}(T_{дп} + 2\xi_{дп} T_{ГУ}) p^2 + (2\xi_{дп} T_{дп} + T_{ГУ}) p + 1}{U_{ПШ} k_{ЭМП} K_{ГУ} K_{vx} K_{мп} (T_\sigma p + 1)(T_p^2 p^2 + 2\xi_p T_p p) / R_Э}, \quad (2)$$

$$W_{PT}(p) = \frac{(T_p^2 p^2 + 2\xi_p T_p + 1)(T_Э T_M p^2 + T_M p + 1)}{b_1 K_З K_{ДТ} (T_C^2 p^2 + 2\xi_C T_C p)(T_\partial p + 1)^2}. \quad (3)$$

Полная функциональная схема микроконтроллерной системы управления скоростью подачи и током асинхронного электродвигателя взаимосвязанной системы приводов стреловидного исполнительного органа проходческого комбайна приведена на рис. 6.

Аналоговые регуляторы скорости подачи и тока асинхронного электродвигателя привода резания исполнительного органа (2) и (3) в обобщенном виде могут быть представлены следующей передаточной функцией:

$$\frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \ldots + b_2 p^2 + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \ldots + a_2 p^2 + a_1 p},$$

которую для программирования необходимо дискретизировать. Это выполнено по методике, разработанной автором и изложенной в работе [3]. Результатом дискретизации являются следующие разностные уравнения в переменных состояния:

$$X_{1(k)} = X_{1(k-1)} + \Delta t X_{2(k-1)},$$

$$X_{2(k)} = X_{2(k-1)} + \Delta t X_{3(k-1)},$$

$$X_{3(k)} = X_{3(k-1)} + \Delta t X_{4(k-1)},$$

$$X_{(n-1)(k)} = X_{(n-1)(k-1)} + \Delta t X_{n(k-1)},$$

$$X_{n(k)} = (1 - \frac{a_{n-1}}{a_n}\Delta t) X_{n(k-1)} + (-\frac{a_{n-2}}{a_n} X_{(n-1)(k-1)} - \ldots - \frac{a_1}{a_n} X_{2(k-1)} - \frac{a_0}{a_n} X_{1(k-1)} + \frac{1}{a_n} U)\Delta t,$$

$$Y = b_n X_{nk} + b_{n-1} X_n + b_{n-2} X_{n-1} + \ldots + b_1 X_2 + b_0 X_1. \qquad (4)$$

Уравнение (4) связывает выходной сигнал регулятора с переменными состояния X_i. Выходной сигнал регулятора тока Y должен быть ограничен. Если ограничить только выходной сигнал регулятора Y, то будет происходить накопление сигнала.

$Y = Y_{TEK}$

$$if\ Y > Y_M, no\ Y = Y_M$$

где Y_{TEK}, Y_M – соответственно текущее и максимальное значения выходного сигнала регулятора.

Это следует из того, что в соответствии с уравнением (4), выходной сигнал Y представляет nсобой сумму переменных состояния x_i с весовыми коэффициентами b_i (4), а эти слагаемые продолжают расти до тех пор, пока сигнал задания на входе регулятора не станет равен сигналу обратной связи. В результате равенство (4) нарушается и имеет место неравенство:

$$Y < b_n X_{nk} + b_{n-1} X_n + b_{n-2} X_{n-1} + \ldots + b_1 X_2 + b_0 X_1.$$

Накопление сигнала прекратится только в момент сравнения сигнала задания с сигналом обратной связи. После этого правая часть последнего неравенства начнет уменьшаться, но некоторое время неравенство будет выполняться. В результате имеет место существенное затягивание переходных процессов с большим перерегулированием.

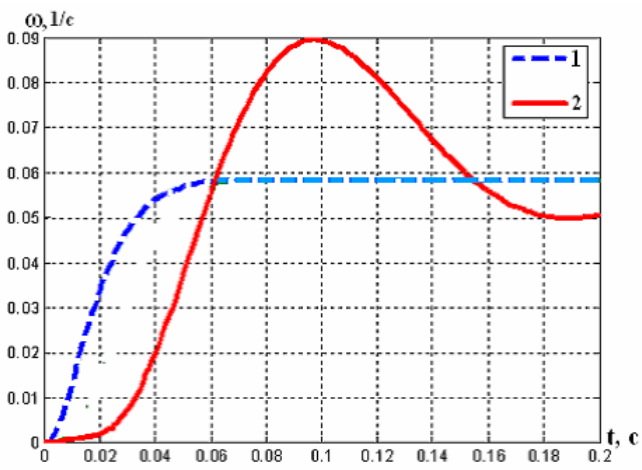

Рис. 3. Кривые переходных процессов скорости подачи: *1* - астатический регулятор без использования алгоритма противонакопления: *2* - астатический регулятор с использованием алгоритма противонакопления

Чтобы исключить накопление сигнала, необходимо ограничить все переменные состояния, выполнив следующий алгоритм:

$Y=Y_{ТЕК}$

$$if\ Y > Y_M, no\ X_{nk} = X_{nk.n} \ldots X_n = X_{nn} \ldots X_{n-1} = X_{n-1.n} \ldots X_1 = X_{1.n}$$

где $X_{nk,п}$, $X_{nп,}$, $X_{n-1,п}$, … $X_{1,n}$ – значения переменных состояния на предыдущем интервале дискретизации.

Влияние процесса накопления сигнала показано на рис. 3, кривая 2. Из рис. 3 следует, что время разгона привода подачи от нулевого значения до максимального без накопления сигнала (кривая 1) составляет 0.06 с, а при накоплении сигнала это время возрастает до 0.2 с, причем имеет место перерегулировании в 50 %.

На рис. 7 показаны переходные процессы отработки скачкообразного изменения нагрузки в полной системе управления током электродвигателя привода резания.

Выводы:

- создана уточненная модель объекта управления контура скорости подачи исполнительного органа, в которой управление гидроцилиндром осуществляется от трехзвенного электрогидравлического преобразователя;
- предложена нелинейная двухмассовая модель объекта управления контура тока, обеспечивающая синтез регулятора тока на основе метода синтеза систем с медленными и быстрыми движениями;
- предложена в качестве желаемой передаточная функция медленных движений второго порядка, которая обеспечила простые условия задания показателей качества системы управления, а дополнительные быстрые движения обеспечивают физическую реализуемость регулятора;
- сформирована модель забоя, позволившая составить структурную схему всей системы во взаимосвязи контуров скорости подачи и регулирования тока электродвигателя привода резания;
- выполнены исследования контуров скорости подачи электрогидропривода и регулирования тока электродвигателя привода резания, исследования подтвердили соответствие созданной системы поставленным задачам;

- разработан алгоритм противонакопления выходного сигнала дискретного регулятора с интегрирующей составляющей при работе в зоне ограничения, что обеспечивает плавный без перерегулирования переходной процесс;

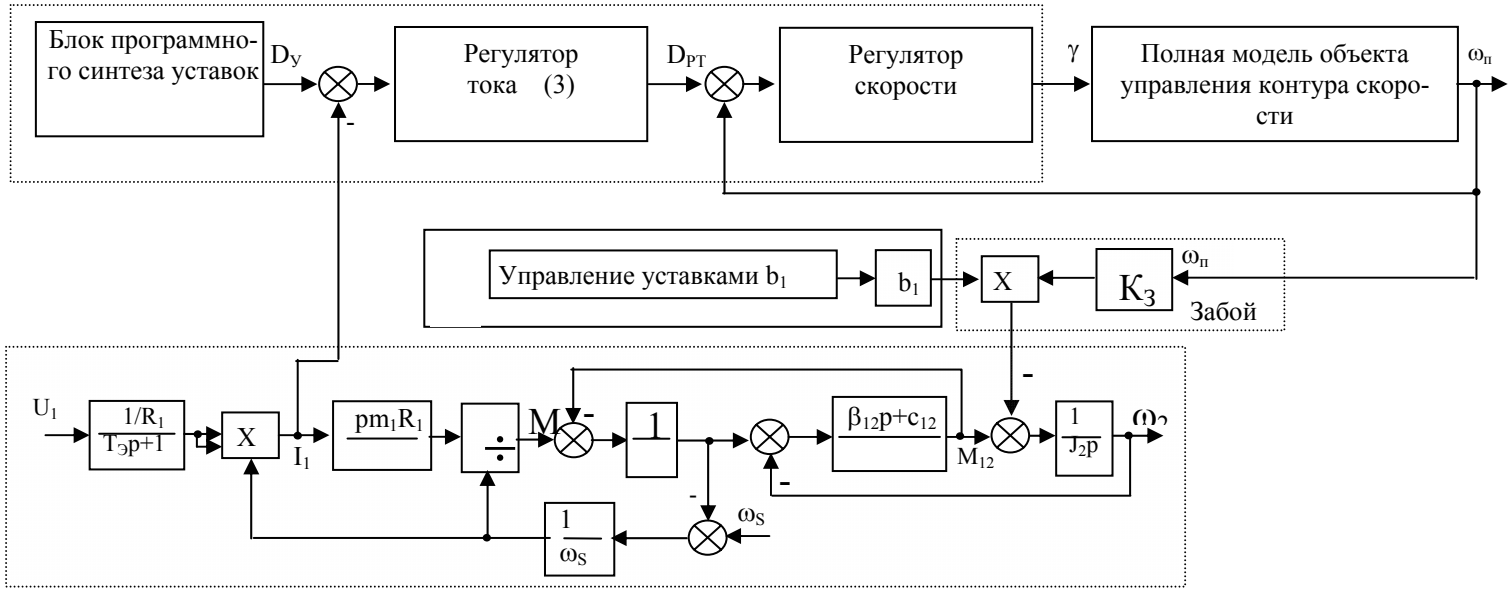

Рис. 4. Структурная схема взаимосвязанной системы приводов исполнительного органа проходческого комбайна

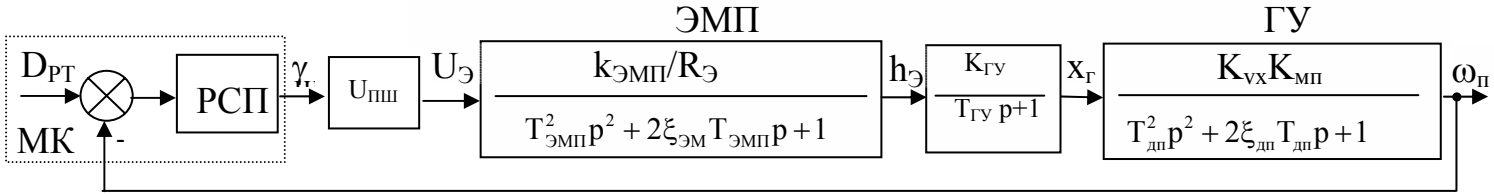

Рис. 5. Структурная схема контура управления скоростью подачи с полной моделью объекта управления

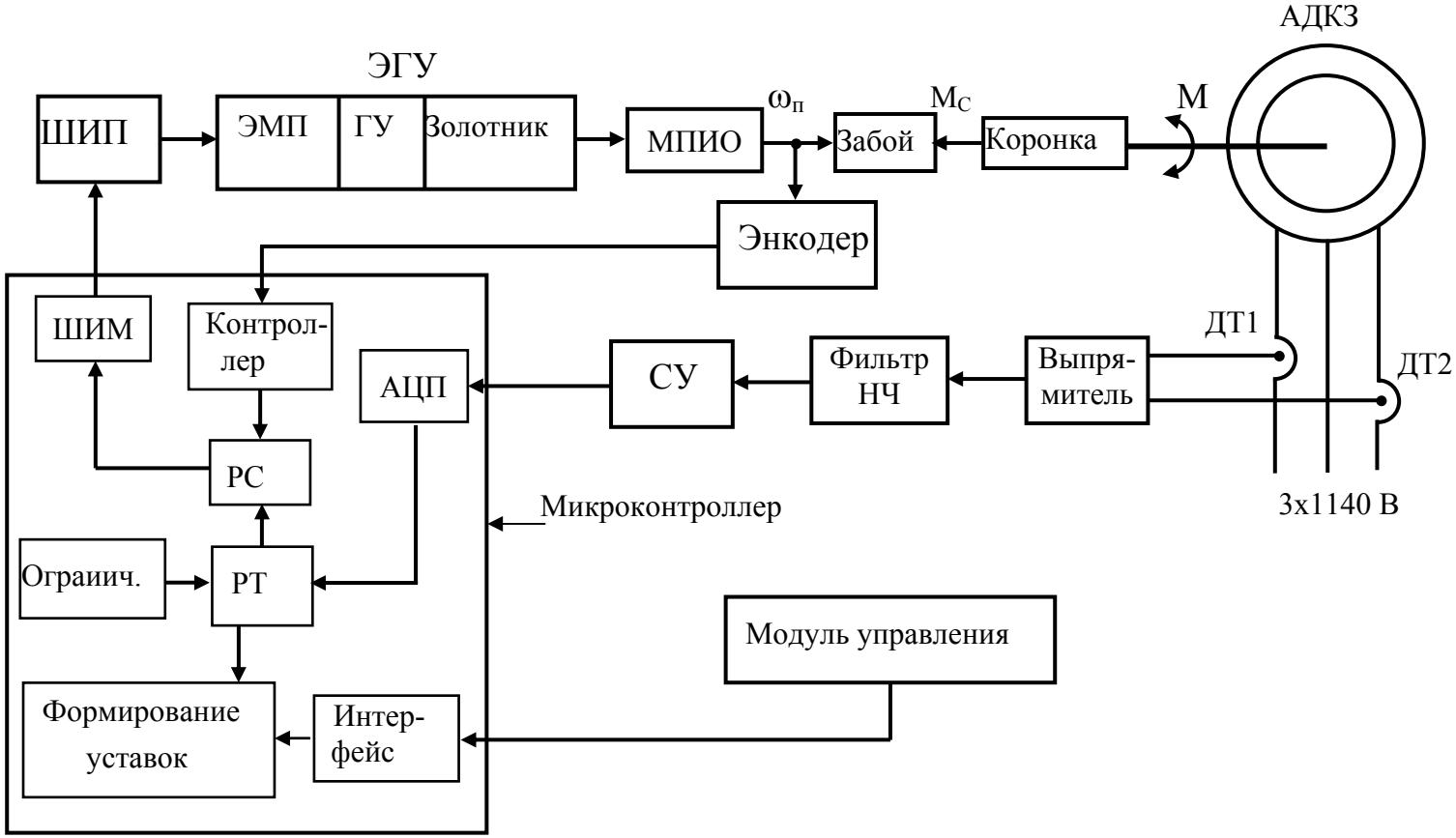

Рис. 6. Функциональная схема взаимосвязанной системы приводов подачи и резания исполнительного органа

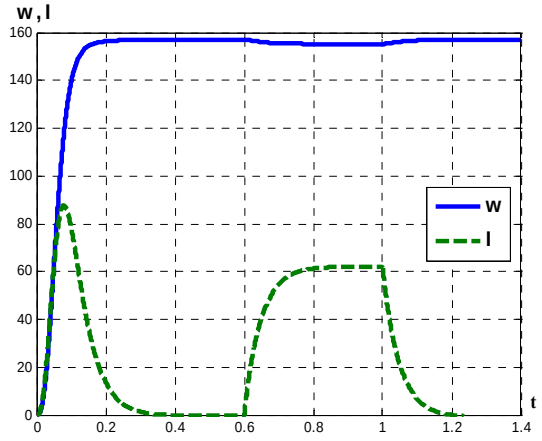

Рис. 7. Переходные процессы по току и скорости электродвигателя привода резания исполнительного органа проходческого комбайна

- сформированы переходные и установившиеся процессы с заданными показателями точности, быстродействия и перерегулирования, что позволило получить при наложенных ограничениях максимум производительности, повышение надежности и долговечности проходческого комбайна в условиях действия нагрузок, превышающих предельно допустимые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мещерин А.Т.* Экспериментальное исследование режима стопорения исполнительного органа проходческого комбайна ПК– 3М / А.Т. Мещерин // Механизация горных работ на угольных шахтах: сб. научн. трудов / Тульский политехнический институт. – Тула. 1976. – с. 51 – 53.

2. *Мещерина Ю.А.* Однофазная модель электромагнитных процессов трехфазного электродвигателя / Ю.А. Мещерина // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. научн. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк. 2008. – с. 215 – 220.

3. *Мещерина Ю.А.* Метод синтеза систем с заданными переходными и установившимися процессами / Ю.А. Мещерина // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. научн. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т.– Новокузнецк. 2008. – с. 215 – 220. ГИАБ

Коротко об авторах

Мещерина Ю.А. – ассистент;
Пугачев Е.В. – доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, зав. кафедрой «электромеханики»,
Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк.

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Г. Каширских.*

© Ю.А. Мещерина, 2008

УДК 622.232.83-522

Ю.А. Мещерина

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УСИЛИЯ ПОДАЧИ ОТ УГЛА ПОВОРОТА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА

Установлена нелинейная зависимость усилия подачи от угла поворота стрелы исполнительного органа и усилия на штоке гидроцилиндра проходческого комбайна.

Кинематическая передача от штока гидроцилиндра к исполнительному органу проходческого комбайна состоит из турели, платформы, направляющих и представляет собой систему рычагов и тяг, нелинейно преобразующих поступательную скорость перемещения штока гидроцилиндра в угловую скорость поворота стрелы исполнительного органа. Эти преобразования приводят к тому, что процессы передачи усилия подачи описываются сложными нелинейными алгебраическими уравнениями, которые из соображений приемлемости в литературных источниках, например [1], описываются в упрощенной форме:

$$F_Л = F_{шт} \frac{R_m}{L_{стр}} \cos\alpha, \qquad (1)$$

где $F_{шт}$, $F_Л$ - усилие подачи на штоке и тангенциальное усилие, обеспечивающее поворот турели и стрелы исполнительного органа; R_m, $L_{стр}$ – радиус турели и длина стрелы.

Система управления на основе микроконтроллера позволяет реализовать сложные алгоритмы управления, поэтому целесообразно иметь не упрощенную, а точную нелинейную функциональную зависимость. Это обеспечит синтез компенсирующей нелинейности в алгоритме управления и решить две важные задачи: выровнять статическую нагрузку вдоль линии резания поверхности забоя и обеспечить алгоритмическую линеаризацию системы управления, что существенно упростит синтез регуляторов.

Кинематическая схема передачи усилия подачи от штока гидроцилиндра к исполнительному органу приведена на рис. 1, на котором обозначено: K – коронка исполнительного органа; $O_Г$, $O_В$ – соответственно вертикальная ось поворота турели со стрелой в горизонтальной плоскости и горизонтальная ось вертикального подъема стрелы исполнительного органа; α, α_m - угол горизонтального поворота стрелы относительно продольной оси комбайна и его максимальное значение; $B_{л0}$, $B_л$ - два положения точки соединения штока гидроцилиндра с турелью.

Из прямоугольного треугольника $B_Л F_Л F_{ШТ}$ найдем тангенциальную составляющую усилия $F_Л$, создающую вращающий момент турели:

$$F_Л = F_{ШТ} \cos(\beta_Л) \qquad (2)$$

и воспользуемся теоремой синусов для треугольника $A_Л B_Л O_Г$:

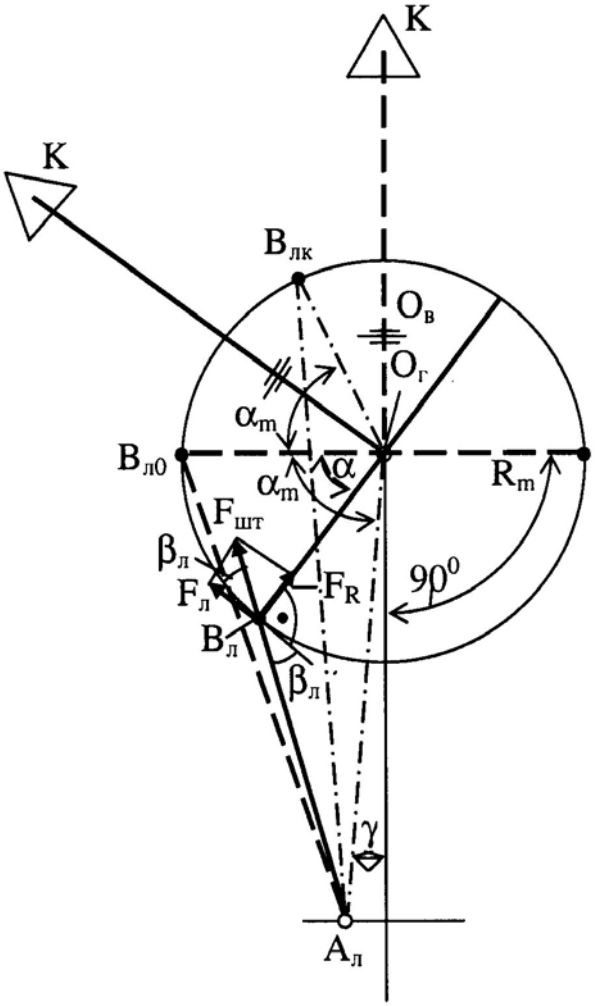

Рис. 1. Кинематическая схема передачи усилия подачи от штока гидроцилиндра к исполнительному органу комбайна 1ГПКС

$$\frac{A_Л O_Г}{\sin(\beta_Л + 90^\circ)} = \frac{A_Л B_Л}{\sin(\alpha_m - \alpha)},$$

где $\angle(\beta_Л+90)$ – угол при вершине $B_Л$, $\angle(\alpha_m-\alpha)$ – угол при вершине $O_Г$. Учитывая, что $\sin(\beta_Л + 90^\circ) = \cos(\beta_Л)$, последнее соотношение приведем к виду:

$$\cos(\beta_Л) = \frac{A_Л O_Г}{A_Л B_Л}\sin(\alpha_m - \alpha) \quad (3)$$

Подставляя найденное значение $\cos(\beta_Л)$ из выражения (3) в уравнение (2) найдем:

$$F_Л = F_{ШТ}\frac{A_Л O_Г}{A_Л B_Л}\sin(\alpha_m - \alpha) \quad (4)$$

Чтобы установить зависимость длины гидроцилиндра с частично втянутым штоком $A_Л B_Л$ от угла поворота стрелы α, воспользуемся теоремой косинусов применительно к треугольнику $A_Л B_Л O_Г$:

$$(A_Л B_Л)^2 = R_m^2 + (A_Л O_Г)^2 - 2(R_m * A_Л O_Г)\cos(\alpha_m - \alpha). \quad (5)$$

Значение $A_Л B_Л$ из уравнения (5) подставим в выражение (4). В результате получим нелинейное уравнение, связывающее тангенциальное усилие $F_Л$ в месте соединения турели со штоком левого гидроцилиндра с усилием на штоке гидроцилиндра $F_{ШТЛ}$ и углом поворота турели α:

$$F_Л = F_{ШТ}\frac{A_Л O_Г \sin(\alpha_m - \alpha)}{\sqrt{R_m^2 + (A_Л O_Г)^2 - 2(R_m * A_Л O_Г)\cos(\alpha_m - \alpha)}}, \quad (6)$$

где $A_Л O_Г$ и α_m - определяются по паспортным данным.

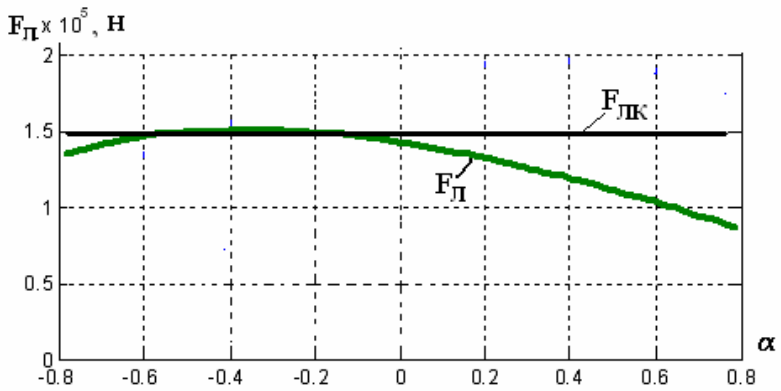

Рис. 2. Зависимость тангенциального усилия подачи на турели от угла поворота стрелы исполнительного органа

Точное соотношение (6) существенно отличается от приближенного выражения (1) и более сложное по своей структуре. На рис. 2 функция $F_Л$ представлена графически, откуда следует, что отклонение усилия подачи при изменении угла поворота турели от -0.8 до 0.8 радиан в секунду достигает 50% и поэтому целесообразно введение корректирующего воздействия.

Алгоритм компенсации нелинейного преобразования усилия на штоке гидроцилиндра в усилие подачи на исполнительном органе реализуем программно в микроконтроллере. Для этого управление гидроцилиндром будем осуществлять с помощью электрогидравлического усилителя с коэффициентом преобразования $K_{ЭГУ}$. Алгоритм компенсации Y_K построим для установившегося режима, пренебрегая инерционностью электрогидравлического усилителя. Динамическую компенсацию обеспечим приближенно, за счет введения обратной связи по угловой скорости $\omega_П$ подачи исполнительного органа и регулятора, синтезированного по методике, изложенной в работе [2].

Для установившегося процесса получим соотношение:

$$F_Л = Y_K * K_{ЭГУ} * F_{ШТ} \frac{A_Л O_Г \sin(\alpha_m - \alpha)}{\sqrt{R_m^2 + (A_Л O_Г)^2 - 2(R_m * A_Л O_Г)\cos(\alpha_m - \alpha)}}, \quad (7)$$

на основании которого, для желаемого усилия $F_{ЛК}$, можно записать:

$$Y_K = \frac{F_{ЛК}\sqrt{R_m^2 + (A_Л O_Г)^2 - 2(R_m * A_Л O_Г)\cos(\alpha_m - \alpha)}}{K_{ЭГУ} F_{ШТ} * A_Л O_Г \sin(\alpha_m - \alpha)}, \quad (8)$$

где $F_{ЛК}$=const – желаемое усилие на турели в точке $B_{Л0}$ (рис. 1).

Подстановка Y_K из выражения (8) в уравнение (7) дает: $F_Л = F_{ЛК}$ – постоянное значение усилия в скорректированной системе (рисунок 2).

Перерасчет усилия на турели к усилию подачи на исполнительном органе вычисляем из соотношения, известного из курса физики:

$$\frac{F_К}{F_{ЛК}} = \frac{R_m}{К * О_Г}, \qquad (9)$$

где $К * О_Г$ - горизонтальная проекция стрелы от оси вращения $О_Г$ до центра коронки (рис. 1), $F_К$ – усилие подачи, приложенное к исполнительному органу.

Алгоритм коррекции (8) представляет собой чисто алгебраическое выражение, запрограммировать которое в микроконтроллере не сложно, если измеряется угол поворота α исполнительного органа. Для измерения угла поворота исполнительного органа применен однооборотный абсолютной энкодер на 32 бита.

Выводы:

- установлена нелинейная зависимость усилия подачи от угла поворота стрелы исполнительного органа и усилия на штоке гидроцилиндра проходческого комбайна;

- разработан алгоритм управления, компенсирующий нелинейность усилия подачи, что позволило выровнять статическую нагрузку вдоль линии резания поверхности забоя и обеспечило алгоритмическую линеаризацию системы управления для упрощения синтеза регуляторов. ГИАБ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Солод В.И.* Горные машины и автоматизированные комплексы / В.И. Солод, В.И. Зайков, К.М. Первов // М.: Недра. – 1981. – 503с.

2. *Мещерина Ю.А.* Метод синтеза систем с заданными переходными и установившимися процессами / Ю.А. Мещерина // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. научн. статей / Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк. 2008. – с. 215 – 220.

Коротко об авторе

Мещерина Ю.А. – ассистент; Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк.

Рецензент д-р техн. наук, проф. *В.Г. Каширских.*