

УДК 62-83:621.879.017

М. А. Гордеев-Бургвиц

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ В ОБОБЩЕННЫХ ПРОИЗВОДНЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МОЩНЫХ АГРЕГАТОВ
В СТРОИТЕЛЬНЫХ И ГОРНЫХ МАШИНАХ И В СИСТЕМАХ ВОДООТВЕДЕНИЯ**

Посвящена получению алгоритма управления взаимосвязанными электроприводами мощных шагающих экскаваторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: драглайн, системы управления приводами, ковш.

The article is devoted to the acquisition of algorithm for using interconnected electric drives of powerful walking dredge.

К e y w o r d s: dragline, drive control system, bucket.

Для исследования динамики систем управления электроприводами, например, строительных и горных машин или мощных насосных агрегатов необходимо выполнить математическое описание отдельных элементов, составить математическую модель и уравнения динамики системы управления [1—3].

Предлагаемое математическое описание сделано применительно к современной оптимальной структуре электропривода — двухконтурной системе подчиненного регулирования по системе ТП-Д, причем регуляторы тока и скорости выполнены на операционных усилителях.

Составим уравнения динамики системы управления электроприводом, принимая, что многодвигательные приводы представляются системами однодвигательного привода; индуктивность якорных цепей постоянна, не зависит от тока якоря и тока возбуждения; зазоры в зубчатых зацеплениях и муфтах приводов полностью отсутствуют; все агрегаты не подвержены упругим колебаниям и абсолютно жестки.

При математическом описании динамических звеньев применяются классические дифференциальные уравнения, передаточные функции, а также дифференциальные уравнения в обобщенных производных в связи с применением при исследовании метода обобщенных функций.

Запишем уравнения динамики системы из двух взаимосвязанных приводов, работающих на одну нагрузку.

1. Двигатели постоянного тока (Д). Принимаем нагрузку привода постоянной, поскольку при работе рабочих агрегатов ее изменение невелико и не оказывает существенного влияния на характер исследуемых процессов.

Запишем дифференциальное уравнение для якорной цепи двигателя и уравнение движения:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\text{пр}} &= I_{\text{я}} R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} + \varepsilon_{\text{гб}}, \\ K_F I_{\text{я}} - F_C &= m_T \frac{dV_T}{dt}.\end{aligned}\tag{1}$$

Оба уравнения этой системы можно представить соответственно апериодическим и интегрирующим звеном с передаточными функциями [1, 2]:

$$W_{1\partial(p)} = \frac{I_{я(p)}}{U_{вх(p)}} = \frac{1/R_{я}}{1 + T_{я}p},$$

$$W_{2\partial(p)} = \frac{V(p)}{I_{вх(p)}} = \frac{R_{я}/K_E}{T_M p}, \quad (2)$$

где $I_{я}$ — ток якорной цепи привода тяги; $R_{я}$, $L_{я}$ — сопротивление и индуктивность якорной цепи соответственно; $\varepsilon_{пр}$, $\varepsilon_{дв}$ — ЭДС тиристорного преобразователя и двигателя; $K_F = \frac{F_a}{I_{я}}$, $K_E = \frac{\varepsilon_{дв}}{V_T}$ — коэффициенты пропорциональности; $F_{д}$, F_c — сила двигателя и усилие сопротивления движению соответственно; M_t — масса двигателя и механизма; V_t — скорость длины тягового каната; $T_M = \frac{R_{я}m_T}{K_E K_F}$ — электромеханическая постоянная двигателей;

$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}}$ — электромагнитная постоянная якорной цепи; $U_{вх} = \varepsilon_{пр} - \varepsilon_{дв}$;

$I_{вх} = I_{я} - F_c / K_F$.

Запишем систему дифференциальных уравнений (1) в обобщенных производных:

$$L_{я}DI_{я} + I_{я}R_{я} = \varepsilon_{пр} - K_E V_T, \quad (3)$$

$$M_T DV_T = K_F I_{я} - F_c.$$

2. Тиристорный преобразователь (ТП) заменяется звеном первого порядка с эквивалентной постоянной времени, учитывающей его чистое запаздывание и малые инерционности системы управления [1, 4, 5]:

$$T_{\mu} \frac{d\varepsilon_{пр}}{dt} + \varepsilon_{пр} = K_{пр} U_{РТ}, \quad (4)$$

где T_{μ} — суммарная некомпенсируемая постоянная токового контура; $K_{пр}$ — коэффициент усиления преобразователя; $U_{РТ}$ — напряжение на выходе регулятора тока (РТ).

Запишем (4) в обобщенных производных:

$$T_{\mu} D\varepsilon_{пр} + \varepsilon_{пр} = K_{пр} U_{РТ}. \quad (5)$$

3. Регулятор тока (РТ). Методика выбора передаточных функций регуляторов тока и скорости в многоконтурных системах подчиненного регулирования с последовательной коррекцией подробно описана, например, в [1, 4, 5].

Передаточная функция регулятора тока:

$$U_c = U_{c \min} + K_{gl} \Delta(l_n + l_m), \quad (6)$$

Переходя от изображений к оригиналам в (6), получим уравнение

$$T_{\text{и}} \frac{dU_{pt}}{dt} = U_{30}, \quad (7)$$

где $T_{\text{и}} = \frac{2K_{30}K_{\text{пр}}K_m T_{\mu}}{R_a}$ — постоянная времени регулятора тока;

$U_{pt} \in [U_{pt \min}; U_{pt \max}]$ — выходное напряжение регулятора тока; U_{30} — выходное напряжение звена ограничения. Запишем U_{pt} в обобщенных производных:

$$T_{\text{и}} D = U_{30}. \quad (8)$$

4. Звено ограничения (ЗО). Уравнение звена ограничения:

$$U_{30} = K_{30}(U_{ph} - U_{ot}), \quad (9)$$

где K_{30} — коэффициент передачи звена ограничения; $U_{ot} = K_T I_{\text{я}}$ — напряжение отрицательной обратной связи по току, где K_T — коэффициент передачи датчика тока.

$$U_{30} \in [U_{30 \min}; U_{30 \max}].$$

5. Регулятор напряжения (РН). Передаточная функция регулятора напряжения:

$$W_{\text{РН}(p)} = \frac{U_{\text{РН}(p)}}{U_{\text{вхРН}(p)}} = \frac{T_{\text{и}}}{K_{30}K_{\text{пр}}K_{\text{э}}T_{\text{он}}} = K_{\text{РН}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{вхРН}} = -K_{\text{э}}V_T + K_a U_y + K_T / K_{\text{РН}} I_{\text{я}}$; $U_{\text{вхРН}}$ — входное напряжение регулятора напряжения; $K_{\text{РН}}$ — коэффициент пропорциональности регулятора напряжения; K_a , K_y — коэффициент усиления и выходное напряжение регулятора третьего контура; $K_{\text{э}}$ — коэффициент передачи датчика напряжения; $T_{\text{он}}$ — расчетная постоянная интегрирования контура регулирования напряжения.

$$U_{\text{РН}} = -K_{\text{РН}}K_{\text{э}}V_T + K_{\text{РН}}K_a U_y + K_m I_{\text{я}}, \quad (11)$$

$$U_{\text{РН}} \in [U_{\text{РН} \min}; U_{\text{РН} \max}].$$

Уравнения (1, 4, 7, 11) описывают динамику электромеханической системы одного привода тяги. Электромеханическая система второго привода подъема идентична системе первого привода тяги, а, следовательно, уравнения динамики электромеханической системы второго привода идентичны указанным выше и будут приведены ниже при записи полной системы уравнений динамики электромеханических систем обоих взаимосвязанных приводов в режиме их совместной работы на одну нагрузку.

6. Уравнение суммы длин канатов, которыми прикреплен рабочий орган. В операторной форме

$$l_n + l_m = \frac{V_m + V_n}{P}. \quad (12)$$

Для удобства отсчет суммы длин канатов будем вести от минимально допустимой величины $(l_n + l_m)_{\min}$, т. е.

$$\Delta(l_n + l_m) = (l_n + l_m) - (l_n + l_m)_{\min}. \quad (13)$$

$$\text{Тогда } \Delta(l_n + l_m) = \frac{V_m + V_n}{P}. \quad (14)$$

Переходя в (14) от изображений к оригиналам и записывая в обобщенных производных, получим уравнение движения суммы длин канатов в обобщенных производных:

$$D\Delta(l_n + l_m) = V_n + V_m. \quad (15)$$

7. Сельсины-датчики суммы длин канатов. Характеристика сельсинов-датчиков представляет собой косинусоиду, сдвинутую на величину амплитуды вдоль оси ординат.

Рабочая точка выбирается в нижней части характеристики из условия обеспечения требуемой крутизны характеристики и соответствует минимально допустимой сумме длин канатов $(l_n + l_m)_{\min}$.

В пределах $(l_n + l_m)_{\min} - (l_n + l_m)_{\max}$ $[(l_n + l_m)y_{\max}$ — максимальная установка начала работы защиты с учетом ее регулирования в функции скоростей приводов] характеристика датчика практически линейна. Зависимость выходного напряжения сельсинов U_c от суммы длин канатов на рабочем участке характеристики (отсчет суммы длин канатов ведется от минимально допустимой величины в соответствии с (13)):

$$U_c = U_{c\min} + K_{g1}\Delta(l_n + l_m), \quad (16)$$

где $U_{c\min}$ — минимальное выходное напряжение датчиков, соответствующее минимально допустимой сумме длин канатов; K_{g1} — угловой коэффициент линеаризованной характеристики датчиков.

8. Магнитный усилитель системы управления положением нагрузки (УР). Принимая, что на рабочем участке характеристика магнитного усилителя линейна и выходное напряжение усилителя равно нулю во всей зоне левее точки ее пересечения с осью абсцисс, запишем уравнение динамики магнитного усилителя в операторной форме:

$$U_{yp}(1 + pT_{yp}) = m_3 K_{g1}\Delta(l_n + l_m) + K_c(V_n + V_m), \quad (17)$$

где T_{yp} — суммарная постоянная времени усилителя:

$$T_{yp} = \sum T_i, \quad (18)$$

где T_i — постоянная времени цепи i -й обмотки управления:

$$T_i = \frac{R_{\text{вых}}}{R_{yi}} \frac{W_i^2}{2fW_p^2}, \quad (19)$$

где $R_{\text{вых}}$ — сопротивление нагрузки магнитного усилителя; R_{yi} , W_i — омическое сопротивление цепи и число витков i -й обмотки управления; f — частота питающего напряжения; W_p — число витков рабочей обмотки усилителя.

$$K_c = \frac{m_4 K_{\text{еп}}}{2} = \frac{m_5 K_{\text{еп}}}{2}, \quad (20)$$

где K_c — коэффициент усиления магнитного усилителя по величине скоростей приводов подъема и тяги; $m_3 \dots m_5$ — коэффициенты усиления по напряжению третьей, четвертой и пятой обмоток управления.

Направление скоростных сигналов показано при движении приводов в сторону наматывания канатов. При вытравливании канатов направление скоростных сигналов будет противоположное.

Обозначим

$$m_3 K_{g1} = K_g. \quad (21)$$

Подставим (21) в (17) и, переходя от изображений к оригиналам и записывая в обобщенных производных, получим уравнение движения магнитного усилителя в обобщенных производных:

$$T_{yp} DU_{yp} = -U_{yp} + K_g \Delta(l_n + l_m) + K_c (V_n + V_m). \quad (22)$$

9. Система автоматического перемещения нагрузки. Уравнение динамики магнитного усилителя системы перемещения нагрузки в операторной форме:

$$U_{yt} (1 + pT_{yt}) = U_{yto} - K_g \Delta(l_n + l_m) + K_{gn} \Delta l_n K + K_c (V_m + V_n).$$

При

$$U_{yto} - K_g \Delta(l_n + l_m) < K_{gn} \Delta l_n K, \quad U_{yt} = 0,$$

при

$$U_{yto} - K_g \Delta(l_n + l_m) \geq K_{gn} \Delta l_n K, \quad (23)$$

где $U_{yt} [U_{yt \min}; U_{yt \max}]$,

где U_{yto} — максимальное установившееся выходное напряжение магнитного усилителя, соответствующее минимально допустимой сумме длин канатов $(l_n + l_m)_{\min}$.

Уравнение длины подъемного каната:

$$\Delta l_n = \frac{V_n}{P}, \quad (24)$$

$$K_{gn} = \frac{m_{6,7}}{1 - m_1} K_{gn1}, \quad (25)$$

где K_{gn1} — угловой коэффициент линеаризованной характеристики датчика длины подъемного каната; $m_1, m_{6,7}$ — коэффициенты усиления по напряжению первой и последовательно соединенных шестой и седьмой обмоток управления.

10. Полное уравнение системой управления двух взаимосвязанных электроприводов, работающих на одну нагрузку. На основании уравнений (1), (4), (7), (9), (11), (14), (17), (23), (24) запишем полную систему уравнений, описывающую совместную работу электромеханических систем двух взаимосвязанных приводов:

$$L_{я} \frac{dI_{яТ}}{dt} = I_{яТ} R_{я} + \varepsilon_{двт} \varepsilon_{прТ}, \quad (26)$$

$$m_t \frac{dI_m}{dt} = K_f I_{яТ} - F_{сТ}, \quad (27)$$

$$T_{\mu} \frac{d\varepsilon_{прТ}}{dt} = K_{пр} U_{рТТ} - \varepsilon_{прТ}, \quad (28)$$

$$T_u \frac{dU_{рТТ}}{dt} = U_{зот}, \quad (29)$$

$$U_{зот} = -K_{зот} K_{рнт} K_{кэт} V_T + K_{зот} K_{рнт} K_a U_y, \quad (30)$$

$$L_{я} \frac{dI_{яП}}{dt} = I_{яП} R_{я} + \varepsilon_{двП} - \varepsilon_{прП}, \quad (31)$$

$$m_n \frac{dV_n}{dt} = K_f I_{яП} F_{сП}, \quad (32)$$

$$T_{\mu} \frac{d\varepsilon_{прП}}{dt} = K_{пр} U_{рПП} - \varepsilon_{прП}, \quad (33)$$

$$T_u \frac{dU_{рПП}}{dt} = U_{зоп}, \quad (34)$$

$$U_{зоп} = -K_{зоп} K_{рнт} K_{эп} V_n + K_{зоп} K_{рнт} K_a U_y, \quad (35)$$

$$\frac{d\Delta(l_n + l_m)}{dt} = V_n + V_m, \quad (36)$$

$$T_{уп} \frac{dU_{ур}}{dt} = K_g \Delta(l_n + l_m) + K_c (V_n + V_m) - U_{ур}, \quad (37)$$

$$\frac{d\Delta l_n}{dt} = \frac{V_n}{p}, \quad (38)$$

$$T_{ут} \frac{dU_{ут}}{dt} = U_{уто} K_g \Delta(l_n + l_m) + K_{gn} \Delta l_n K + K_c (V_t - V_n) - U_{ут}. \quad (39)$$

Уравнения (26—37) описывают динамику электромеханических систем двух приводов. Уравнения (26—36), (38), (39) описывают динамику этих систем в режиме автоматического перемещения нагрузки.

Таким образом, получена система дифференциальных уравнений 12-го порядка, описывающая динамику работы двух взаимосвязанных приводов на одну общую нагрузку, которая позволяет получить далее передаточную функцию всей системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гордеев-Бургвиц М. А.* Моделирование САУ транспортированием ковша в функции длин канатов мощного шагающего экскаватора-драглайна // Сборник трудов Международ. научн. конф., посвященной 90-летию МГСУ-МИСИ «Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании» 19—21 октября 2011. М. : МГСУ, 2011.

2. *Бессекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1972. С. 768.

3. *Сапериштейн Н. Д.* Процессы автоматического управления и обобщенное дифференцирование. М. : Высшая школа, 1973. С. 240.

1. *Gordeev-Burgvits M. A.* Modelirovanie SAU transportirovaniem kovsha v funktsii dlin kanatov moshchnogo shagayushchego ekskavatora-draglayna // Sbornik trudov Mezhdunarod. nauchn. konf., posvyashchennoy 90-letiyu MGSU-MISI «Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii» 19—21 oktyabrya 2011. M. : MGSU, 2011.

2. *Bessekerskiy V. A., Popov E. P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. M. : Nauka, 1972. S. 768.

3. *Sapershteyn N. D.* Protsessy avtomaticheskogo upravleniya i obobshchennoe differentsirovanie. M. : Vysshaya shkola, 1973. S. 240.

© Гордеев-Бургвиц М. А., 2013

Поступила в редакцию
в декабре 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Гордеев-Бургвиц М. А. Математическое описание в обобщенных производных систем управления электроприводами мощных агрегатов в строительных и горных машинах и в системах водоотведения // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 4(29). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Gordeev-Burgvits-2013_4\(29\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Gordeev-Burgvits-2013_4(29).pdf)