РАЗДЕЛ XVII. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Буянкин В.М.

Разработка электропривода для управления сложным объектом

МГТУ им. Н.Э. Баумана
(ДНР, Москва)

doi: 10.18411/lj-02-2021-75

idsp: ljournal-02-2021-75

Аннотация

В статье описана разработка электропривода для управления сложным объектом как преобразователя электрической энергии в механическую, который используется в электротранспорте, станкостроении, робототехнике, в объектах вооружения специальной техники. Прделана работа по определению передаточных функций: гироскопических устройств, электронного усилителя, электромашинного усилителя, электродвигателя, объекта управления.

Ключевые слова: электропривод, управление, усилитель, гироскоп, электродвигатель.

На рис. 1 а, б представлены функциональная и структурная схема электропривода для управления сложным объектом.. Электропривод представляет собой замкнутую систему управления, назначение которого заключается в обеспечении стабилизации объекта управления в горизонтальной плоскости. Требуемое направление объекта задается воздействием с помощью специальной системы управления на гироскопический датчик угла. При колебаниях объекта управления возникает возмущающий момент $M_{внк}$ под воздействием которого линия наведения отклоняется от заданного направления. Гироскоп - датчик угла, установленный на объекте сохраняет направление осей в пространстве и при колебаниях объекта непрерывно измеряет угловое рассогласования ϑ между заданным направлением λ_n и его действительным φ_K . Рассогласование преобразуется в электрический сигнал, который усиливается усилителем и поступает на вход электродвигателя и исполнительного механизма. Электродвигатель создает стабилизирующий момент M_c , направленный против возмущающего момента $M_{внк}$. В результате этого происходит уменьшение угла рассогласования ϑ_0 и таким образом заданное направление линии наведения сохраняется неизменным и обеспечивается необходимая точность работы. Для требуемого качества регулирования в системе управления кроме основной обратной связи по углу, имеется обратная связь по угловой скорости объекта управления. Обратная связь по угловой скорости создается при помощи гироскопа.

(a)

(б)

Рис.1. (а, б) Функциональная и структурная схема электропривода для управления сложным объектом

Разрабатываемый электропривод с объектом управления имеет следующие параметры:

1. Момент инерции объекта управления $J = 2000 \text{ КГр м с}^{-1}$
2. Внешний возмущающий момент $M_{\text{внк}} = 100 \text{ КГр м}$
3. Максимальная скорость в рабочем режиме $\dot{\varphi}_k \cdot \varphi_k = 0.55 \text{ рад/с}$
4. Максимальное ускорение в рабочем режиме $\ddot{\varphi}_k \cdot \varphi_k = 10 \text{ л; рад/с}^2$
5. Длительность рабочего цикла $T_{\text{ц}} = 60 \text{ мин}$
6. Время работы электропривода с постоянной скоростью $t_1 = 10 \text{ мин}$
7. Число перебросок, реверсов $n = 7$
8. Суммарная максимальная допустимая ошибка в рабочем режиме $\xi_{\Sigma} = 0.4 \text{ рад}$
9. Время переходного процесса $T = 1 \text{ с}$.
10. Максимальное перегулирование $\delta = 30\%$
11. Число перебегов, перегулирований $\mu = 3$

Для теоретического исследования динамических характеристик необходимо описать работу всех блоков электропривода дифференциальными уравнениями и вывести общую передаточную функцию [1,2,3,4,5,6].

Описание уравнениями работы гироскопического датчика угла

Датчик угла в системе управления является трёхстепенной гироскоп (рис.2) которому предъявляются следующие требования:

- 1) Малые собственные ошибки (существенно меньше, чем ошибка всей системы в целом),
- 2) Линейность характеристик элементов в рабочем диапазоне
- 3) Малая инерционность,
- 4) Низкий уровень помех,
- 5) Небольшой собственный момент трения с целью максимального снижения нагрузки задающей оси,
- 6) Большой срок службы.

Дифференциальные уравнения трёхстепенного гироскопа:

$$\begin{cases} I_x \frac{dw_x}{dt} + f_x w_x = M_{x\Sigma} - H w_y \\ I_y \frac{dw_y}{dt} + f_y w_y = M_{y\Sigma} - H w_x \end{cases} \quad (1)$$

Так как у трехстепенного гироскопа ускорения и моменты инерции рамок малы и не оказывают существенного влияния на характер переходных процессов, то в инженерной практике принято считать трехстепенный гироскоп безынерционным элементом. Поэтому уравнения датчика угла мы можем записать в следующем виде:

$$U_{ДУ} = K_{ВТУ}(\varphi_3 - \varphi_k), \quad (2)$$

где:

$K_{ВТУ}$ – крутизна вращающего трансформатора, преобразующего угол φ_k в напряжение $U_{ДУ}$

Рис. 2. Датчик угловой скорости

Описание уравнениями работы датчика угловой скорости

В данной системе датчиком угловой скорости $\dot{\varphi}_k$ является двухстепенный гироскоп. При повороте основания участка угловой скорости вокруг оси x возникает гироскопический момент, действующий по оси y и равный

$$M_{гy}^{(x)} = I_x \Omega_p w_{ox} \cos \beta = H w_{ox} \cos \beta, \quad (3)$$

где: I_x – момент инерции гироскопа относительно оси x - x

Ω_p – угловая скорость ротора

$\dot{\varphi}_k$ – угловая скорость основания

$M_{пр}$ – противодействующий момент, пропорционален углу поворота

$$M_{пр} = l \eta_{пр} \sin \beta \approx c \beta, \quad (2)$$

где:

l – плечо

$\eta_{пр}$ – жесткость пружин

$\sin \beta = \beta$ - для малых углов

$M_{jy} = I_y \frac{d^2 \beta}{dt^2}$ – инерционный момент рамки и ротора гироскопа относительно оси y

$M_{fy} = f_y w_y$ – момент сил трения в опорах рамки

f_y – коэффициент вязкого трения

$$M_{gy}^{(x)} = M_{jy} + M_{fy} + M_{пр} + M_D, \quad (4)$$

где:

$M_D = f_d w_y$ - момент демпфера

$$I_y \frac{d^2 \beta}{dt^2} + (f_d + f_y) \frac{d\beta}{dt} + c\beta = H\dot{\varphi}_k \quad (5)$$

Переходя к операторной форме:

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)\beta = H_w p \varphi_k, \quad (6)$$

где:

$$W_{дус}(p) = \frac{HK_{вту}/c}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{U_{дус}}{p \varphi_k} \quad (7)$$

$$T_1 = \frac{f_d + f_y}{c} = \frac{p}{c}$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{I_y}{c}}$$

$$K_w = \frac{H}{c}$$

Подставляя данные датчика угловой скорости в уравнение, получаем передаточную функцию в численном виде. Пренебрегая постоянной времени гироскопического датчика угловой скорости, данное уравнение можем записать в следующем виде:

$$U_{дус} = K_{дус} * p * \varphi_k, \quad (8)$$

где:

$M_D = f_d w_y$ - момент демпфера

$$I_y \frac{d^2 \beta}{dt^2} + (f_d + f_y) \frac{d\beta}{dt} + c\beta = H\dot{\varphi}_k \quad (9)$$

Переходя к операторной форме:

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)\beta = H_w p \varphi_k, \quad (10)$$

где:

$$W_{дус}(p) = \frac{HK_{вту}/c}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{U_{дус}}{p \varphi_k} \quad (11)$$

Описание уравнениями работы электронного усилителя

Мощность и крутизна измерительных и корректирующих устройств недостаточна для непосредственного управления ЭМУ, поэтому возникает необходимость в применении электронного усилителя. На усилитель возлагаются следующие требования:

1. Усиление сигналов по напряжению и по мощности,
2. Сложение сигналов ошибки и корректирующих связей,
3. Преобразование постоянного тока в переменный (модуляция) и (демодулированное выпрямление),
4. Автоматическая регулировка усиления в тех случаях, когда крутизна измерительного устройства по каким-либо причинам меняется,
5. Преобразование сигнала ошибки,

6. Усилитель должен обеспечивать необходимые коэффициенты усиления по напряжению и по мощности, линейный характер сложения сигналов и иметь зону нечувствительности не более допустимой, исходя из требования к точности работы системы управления электроприводом. Кроме того, усилитель должен быть малоинерционен и иметь по возможности низкий уровень собственных шумов. Выход усилителя выполняется на постоянном токе, поскольку обмотка возбуждения ЭМУ питается постоянным током. Считая электронный усилитель безынерционным, уравнение электронного усилителя можем записать в следующем виде:

$$U_y = K_{эу}(U_1 + U_2 + U_3), \quad (12)$$

где:

$M_D = f_d w_y$ - момент демпфера

$$I_y \frac{d^2 \beta}{dt^2} + (f_d + f_y) \frac{d\beta}{dt} + c\beta = H\phi_k \quad (13)$$

Переходя к операторной форме:

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)\beta = H_w p \phi_k \quad (14)$$

где:

$$W_{дус}(p) = \frac{HK_{вту}/c}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{U_{дус}}{p \phi_k} \quad (15)$$

где:

$K_{эу}$ – коэффициент усиления электронного усилителя по напряжению

U_1 – напряжение датчика угла,

U_2 – напряжение датчика угловой скорости,

U_3 – напряжение, пропорциональное угловому ускорению вала двигателя.

На рис.3 представлена схема электронного усилителя.

Рис. 3. Схема электронного усилителя

Описание уравнениями работы электромашиного усилителя с поперечным возбуждением

Электромашиный усилитель (ЭМУ) с поперечным возбуждением представляет собой специальный генератор постоянного тока, отличающийся большим коэффициентом усиления по мощности.

Для ЭМУ справедливы следующие уравнения при холостом ходе:

Для контура обмотки управления

$$U_y(s) = I_y(s) * R_y + L_y(s) * I_y(s), \quad (16)$$

Для контура поперечной цепи

$$E_n(s) = c_n * I_y(s) = I_n(s) * R_n + L_n(s) * I_n(s), \quad (17)$$

Для контура продольной цепи

$$E_{a.x}(s) = c_a * I_n(s), \quad (18)$$

где

U_y, I_y, R_y, L_y – соответственно напряжение, ток, сопротивление и индуктивность обмотки управления;

E_n, I_n, R_n, L_n – соответственно напряжение, ток, сопротивление и индуктивность поперечной цепи,

c_n, c_a – коэффициенты пропорциональности.

Совместное решение этих трех уравнений дает:

$$U_y(s)\mu_i = E_{a.x}(s)(1 + \tau_y s)(1 + \tau_n s), \quad (19)$$

где

$$\tau_y = \frac{L_y}{R_y}; \quad \tau_n = \frac{L_n}{R_n}$$

$$\mu_i = \frac{c_n c_a}{R_y R_n} = \mu_1 \mu_2; \quad \mu_1 = \frac{E_n}{U_y}; \quad \mu_2 = \frac{E_{a.x}}{E_n}$$

В действительности процесс нарастания ЭДС, при подаче на обмотку управления ступенчатого напряжения (при нулевых условиях), отличается от монотонного процесса, соответствующего уравнению. Время нарастания ЭДС до установившегося значения, полученного из опыта, меньше, чем получены из уравнения, и переходный процесс имеет не апериодический, а колебательный характер.

Опыт показывает также, что фактический коэффициент усиления по напряжению в 3-5 раз меньше коэффициента μ_i , полученного из уравнения. Это объясняется тем, что в ЭМУ действуют размагничивающие потоки, влиянием которых в обычных генераторах постоянного тока можно пренебречь.

Размагничивающие действия вызывают следующие факторы:

1. Вихревые токи в ракте якоря от поперечного потока,
2. Инерции в ракте якоря от поперечного потока,
3. Токи замедленной коммутации поперечных щеток,
4. Сдвиг поперечных щеток с нейтрального положения в сторону направления вращения якоря.

При учете этих факторов получено следующее уравнение, отражающее действительный процесс в ЭМУ при холостом ходе:

$$\mu_i [U_y(s) - K' E_{a.x}(s)] = E_{a.x}(s)(1 + \tau_y' s)(1 + \tau_y s) \quad (20)$$

или

$$U_y(s)\mu_{xx} = E_{a.x}(s)(1 + a_1 s + a_2 s^2) \quad (21)$$

Здесь

$$\mu_{xx} = \frac{\mu_i}{1 + K' \mu}$$

При работе ЭМУ на нагрузку получим следующее уравнение:

$$U_y(s)\mu_{xx} = E_{a.x}(s)(1 + a_1s + a_2s^2) + I_{я}(s)(R_{\phi} + L_{\phi}s) \quad (22)$$

Описание уравнениями работы электродвигателя

В проектируемом электроприводе в качестве исполнительного устройства применяется электродвигатель постоянного тока.

Уравнение двигателя постоянного тока производится путем изменения напряжения $U_{я}$, приложенного к цепи якоря, при неизменном потоке возбуждения.

Для определения динамических характеристик электродвигателя составляется уравнение:

$$E_a(t) = I_{я}(t)R_y + \frac{dI_{я}(t)}{dt}L_y + K_{\Omega} \frac{d\beta(t)}{dt} \quad (23)$$

$$K_M I_{я}(t) = J_d \frac{d^2(\beta(t))}{dt^2} + K_3 \frac{d\beta(t)}{dt} + \mu_{\beta}(t) \quad (24)$$

Уравнение объекта управления

$$I_k \frac{d^2\varphi_k(t)}{dt^2} = \mu'_{\beta}(t) + K_u \frac{d\varphi_k(t)}{dt} - M_{вн} \quad (25)$$

$M_{вн} = \text{const}$ – внешний возмущающий момент

Таким образом, дифференциальные уравнения, описывающие динамику системы управления электроприводом следующие:

1. Уравнение гироскопического датчика угла

$$u_1(t) = k_1[\alpha_H(t) - \varphi_K(t)], \quad (26)$$

2. Уравнение гироскопического датчика угловой скорости

$$u_2(t) = -K_4 \frac{d\varphi_K(t)}{dt}, \quad (27)$$

3. Уравнение обратной связи по ускорению выходного вала исполнительного двигателя

$$u_3(t) = -K_5 p^2 \beta, \quad (28)$$

4. Уравнение электронного усилителя

$$u_y(t) = K_{эу}(u_1(t) + u_2(t) + u_3(t)), \quad (29)$$

5. Уравнение электромагнитного усилителя

$$\mu_{xx} u_y(t) = \frac{d^2 E_a(t)}{dt^2} a_2 + \frac{dE_a(t)}{dt} a_1 + E_a(t) + I_{я}(t)R_{\phi} + \frac{dI_{я}(t)}{dt} L_{\phi}, \quad (30)$$

6. Уравнение исполнительного двигателя

$$E_a(t) = I_{я}(t)R_y + \frac{dI_{я}(t)}{dt}L_y + K_{\Omega} \frac{d\beta(t)}{dt} \quad (31)$$

$$K_M I_{я}(t) = J_d \frac{d^2\beta(t)}{dt^2} + K_3 \frac{d\beta(t)}{dt} + M_{\beta}(t) \quad (32)$$

$$M_{\beta}(t) = c[\beta(t) - i\varphi_K(t)] \quad (33)$$

7. Уравнение редуктора и объекта управления

$$\mu'_{\beta}(t) = iM_{\beta}(t) \quad (34)$$

$$\varphi_K(t) = \frac{\beta(t)}{i} \quad (35)$$

$$J_K \frac{d^2\varphi_K(t)}{dt^2} = M'_{\beta}(t) - K_4 \frac{d\varphi_K(t)}{dt} \pm M_{вн} \quad (36)$$

Применяя к уравнениям преобразования Лапласа, и считая начальные условия всех перечисленных систем нулевыми, получим систему уравнений в операторной форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1(p) = K_1[\alpha_H(p) - \varphi_K(p)] \\ u_2(p) = K_2 P \varphi_K(p) \\ u_3(p) = K_3 P^2 \beta \\ u_y(p) = K_{3y}[u_1(p) + u_2(p) + u_3(p)] \\ M_{xx} u_y(p) = E_a(p)[a_2 P^2 + a_1 P + 1] + I_\pi(p)[R_\phi + P_\phi^2] \\ E_a(p) = I_\pi(p)[R_y + P_y^2] + K_\Omega \beta(p) \\ K_M I_\pi(p) = J_d p^2 \beta(p) + K_3 P \beta(p) + M_\beta(p) \\ M_\beta(p) = c[\beta(p) - i \varphi_K(p)] \\ M'_\beta(p) = i M_\beta(p) \\ \varphi_K(p) = \frac{\beta(p)}{i} \\ J_K P^2 \varphi_K(p) = M'_\beta(p) - K_4 P \varphi_K(p) + M_{\text{вых}}(p) \\ I_\pi a_{11} + a_{12} \beta + a_{13} \varphi_n = a_{14} \alpha_H \\ I_\pi a_{21} - a_{22} \beta + a_{23} \varphi_n = 0 \\ 0 - a_{32} \beta + a_{33} \varphi_n = M_{\text{вн}} \end{array} \right.$$

где:

$$a_{11} = \left[\frac{(\tau_y p + 1) R_y (1 + a_1 P + a_2 P^2) + (1 + \tau_y P) R_\phi}{1 + a_1 P + a_2 P^2} \right]$$

$$a_{22} = (J_d p^2 + K_3 p + c)$$

$$a_{12} = \left[\frac{K_5 K_{3y} M_{xx} P^2 + K_\Omega (a_2 P^2 + a_1 P + 1)}{1 + a_1 P + a_2 P^2} \right]$$

$$a_{23} = ci = a_{32}$$

$$a_{13} = \left[\frac{K_{3y} M_{xx} K_{\text{вту}} + K_4 K_{3y} M_{xx} P}{1 + a_1 P + a_2 P^2} \right]$$

$$a_{33} = (J_{\text{кр}}^2 + K_y + i^2 e)$$

$$a_{14} = \frac{K_{3y} M_{xx} K_{\text{вту}}}{1 + a_1 P + a_2 P^2}$$

$$a_{21} = K_M$$

$$A(p) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & -a_{22} & a_{23} \\ 0 & -a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = -a_{11} a_{22} a_{33} - a_{21} a_{32} a_{13} + a_{11} a_{32} a_{23} - a_{21} a_{12} a_{33}$$

$$\varphi_K = \frac{1}{A(p)} \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{11} \alpha_H \\ a_{21} & -a_{22} & 0 \\ 0 & -a_{32} & M_{\text{вн}} \end{vmatrix} = \frac{-a_{11} a_{22} M_{\text{вн}} - a_{21} a_{32} a_{14} \alpha_H - a_{21} a_{12} M_{\text{вн}}}{A(p)}$$

$$\varphi_K A(p) = -(a_{11} a_{22} + a_{21} a_{12}) M_{\text{вн}} - a_{21} a_{32} a_{14} \alpha_H$$

$$\varphi_K A(p) = -B(p) \alpha_H - D(p) M_{\text{вн}}$$

$$B(p) = a_{21} a_{32} a_{14}$$

$$D(p) = a_{11} a_{22} + a_{21} a_{12}$$

$$\frac{\varphi_K(p)}{\alpha_H} = \frac{B(p)}{A(p)}$$

При $\alpha_H = 0$:

$$\frac{\varphi_K(p)}{M_{\text{вн}}(p)} = \frac{D(p)}{A(p)}$$

$$A(p) = A(p) = c_0^\Sigma p^7 + c_1^\Sigma p^6 + c_2^\Sigma p^5 + c_3^\Sigma p^4 + c_4^\Sigma p^3 + c_5^\Sigma p^2 + c_6^\Sigma p + c_7^\Sigma,$$

где:

$$c_0^\Sigma = -\tau_y R_y a_2 J_d J_k = -2,8 * 10^{-5}$$

$$c_1^\Sigma = -a_1 \tau_y R_y J_d J_k - a_2 \tau_y R_y J_d K_4 - a_2 \tau_y R_y J_k K_3 - a_2 R_y J_d J_k = 2,3 * 10^{-3}$$

$$c_2^\Sigma = -\tau_y R_y J_d J_k - \tau_y R_y a_1 J_d K_4 - \tau_y R_y a_1 K_3 J_k - \tau_y R_y a_2 J_d i^2 c - a_2 \tau_y R_y K_3 K_4 - \\ - a_2 \tau_y R_y J_k K_3 - a_2 \tau_y R_y J_k c - a_1 R_y J_k J_d - a_2 R_y J_d K_4 - R_y a_2 J_k K_3 - \\ - M_\phi \tau_\phi J_d K_4 + K_M K_\Omega a_2 J_k = -9,5 * 10^{-1}$$

$$c_3^\Sigma = -\tau_y R_y J_d K_4 - \tau_y R_y J_k K_3 - a_1 \tau_y R_y J_d i^2 c - a_1 \tau_y R_y K_3 K_4 - a_1 \tau_y R_y J_k c - \\ - a_2 \tau_y R_y K_3 i^2 c - R_y J_k J_d - a_1 R_y J_d K_4 - a_1 R_y J_k K_3 - R_y a_2 J_d i^2 c - \\ - a_2 R_y K_3 K_4 - a_2 R_y \tau_k c - R_\phi J_d J_k - R_\phi \tau_\phi J_d K_4 - R_\phi \tau_\phi J_k K_3 + \\ + K_M K_5 K_{3y} M_{xx} J_k + K_M K_\Omega a_1 J_k + K_M K_\Omega a_2 K_4 = -14,5$$

$$c_4^\Sigma = -\tau_y R_y K_3 K_4 - \tau_y R_y J_k c - \tau_y R_y J_d i^2 c - a_1 \tau_y R_y K_3 i^2 c - a_1 \tau_y R_y K_4 c - \\ - a_2 \tau_y R_y i^2 c^2 - R_y J_d K_4 - R_y J_k K_3 - a_1 R_y J_d i^2 c - R_y a_1 J_d i^2 c - a_1 R_y K_3 K_4 - \\ - a_1 R_y J_k c - R_y - R_y a_2 K_3 i^2 c - R_y a_2 K_4 c - R_\phi J_d K_4 - R_\phi J_k K_3 - \\ - R_\phi \tau_\phi J_d i^2 c - R_\phi \tau_\phi K_3 K_4 - R_\phi \tau_\phi J_k c + a_2 \tau_y R_y i^2 c^2 + K_M K_5 K_{3y} M_{xx} K_4 + \\ + K_M K_\Omega J_k + K_M K_\Omega a_1 K_4 + K_M K_\Omega a_2 i^2 c = 2,25 * 10^3$$

$$c_5^\Sigma = -\tau_y R_y K_3 i^2 c - \tau_y R_y K_4 c - a_1 \tau_y R_y i^2 c^2 - R_y J_d i^2 c - R_y K_3 K_4 - R_y J_k c - \\ - R_y a_1 K_3 i^2 c - R_y a_1 K_4 c - R_y a_2 i^2 c^2 - R_\phi J_d i^2 c - R_\phi K_3 K_4 - R_\phi J_k c - \\ - R_\phi \tau_\phi K_3 i^2 c - R_\phi \tau_\phi K_4 c + a_1 \tau_y R_y i^2 c^2 + R_y a_2 i^2 c^2 + K_M K_5 K_{3y} M_{xx} i^2 c + \\ - R_\phi \tau_\phi J_d i^2 c - R_\phi \tau_\phi K_3 K_4 - R_\phi \tau_\phi J_k c + a_2 \tau_y R_y i^2 c^2 + K_M K_5 K_{3y} M_{xx} K_4 + \\ + K_M K_\Omega K_4 + K_M K_\Omega a_1 i^2 c = -2,4 * 10^4$$

$$c_6^\Sigma = -\tau_y R_y i^2 c^2 - R_y K_3 i^2 c - R_y K_4 c - a_1 R_y i^2 c^2 - R_\phi K_3 i^2 c - R_\phi K_4 c - \\ - R_\phi \tau_\phi i^2 c^2 - K_M K_4 K_{3y} M_{xx} i c + \tau_y R_y i^2 c^2 + a_1 R_y i^2 c^2 + R_\phi \tau_\phi K_M K_\Omega i^2 c^2 = 4 * 10^5$$

$$c_7^\Sigma = -K_M K_8 K_{3y} M_{xx} i c = 5,6 * 10^6$$

$$\Phi(p) = \frac{\varphi_k(p)}{\alpha_h(p)} = \frac{B(p)}{c_0^\Sigma p^7 + c_1^\Sigma p^6 + c_2^\Sigma p^5 + c_3^\Sigma p^4 + c_4^\Sigma p^3 + c_5^\Sigma p^2 + c_6^\Sigma p + c_7^\Sigma}$$

$$\Phi(p) = \frac{\varphi_k(p)}{\alpha_h(p)}$$

$$= \frac{5,6 * 10^6}{2,8 * 10^{-5} p^7 + 2,3 * 10^{-3} p^6 + 9,5 * 10^{-1} p^5 + 1,45 p^4 + 2,25 * 10^3 p^3 + 2,4 * 10^4 p^2 - 4,5 * 10^5 p + 5,6 * 10^6}$$

$$\Phi(p) = \frac{\varphi_k(p)}{\alpha_h(p)} = \frac{5,6 * 10^6}{p(2,8 * 10^{-5} p^6 + 2,3 * 10^{-3} p^5 + 9,5 * 10^{-1} p^4 + 1,45 p^3 + 2,25 * 10^3 p^2 + 2,4 * 10^4 p - 4,5 * 10^5)}$$

$$D(p) = R_0 p^5 + R_1 p^4 + R_2 p^3 + R_3 p^2 + R_4 p + R_5$$

$$R_0 = a_2 \tau_y R_y J_d = 2 * 10^{-8}$$

$$R_1 = a_2 \tau_y R_y J_d + a_2 \tau_y R_y K_3 + a_2 R_y J_d = 1,1 * 10^{-6}$$

$$R_2 = \tau_y R_y J_d + a_1 \tau_y R_y K_3 + a_2 \tau_y R_y c + a_1 R_y J_d + a_2 R_y K_3 + R_\phi \tau_\phi J_d + K_M K_\Omega a_2 \\ = 4,5 * 10^{-2}$$

$$R_3 = \tau_y R_y K_3 + a_1 \tau_y R_y c + R_y J_d + a_1 R_y K_3 + a_2 R_y c + R_\phi J_d + R_\phi \tau_\phi K_3 + \\ + K_M K_\Omega a_1 + K_M K_5 K_{3y} M_{xx} = 1,2 * 10^{-2}$$

$$R_4 = \tau_y R_y c + R_y K_3 + c R_y a_1 + R_\phi K_3 + R_\phi \tau_\phi c + K_M K_\Omega = 1$$

$$R_5 = R_y + R_\phi c = 7,28$$

$$B(p) = K_M i c K_{3y} M_{xx} K_{BTy} = 5,6 * 10^6$$

$$\Phi_{MBH}(p) = \frac{\varphi_k(p)}{M_{BH}(p)}$$

$$= \frac{2 * 10^{-8} p^5 + 1,1 * 10^{-6} p^4 + 4,5 * 10^{-2} p^3 + 1,2 * 10^{-2} p^2 + p + 7,28}{2,8 * 10^{-5} p^7 + 2,3 * 10^{-3} p^6 + 9,5 * 10^{-1} p^5 + 1,45 p^4 + 2,25 * 10^3 p^3 + 2,4 * 10^4 p^2 - 4,5 * 10^5 p + 5,6 * 10^6}$$

$$\Phi_{MBH}(p) = \frac{\varphi_k(p)}{M_{BH}(p)} = \frac{R_0 p^5 + R_1 p^4 + R_2 p^3 + R_3 p^2 + R_4 p + R_5}{c_0^\Sigma p^7 + c_1^\Sigma p^6 + c_2^\Sigma p^5 + c_3^\Sigma p^4 + c_4^\Sigma p^3 + c_5^\Sigma p^2 + c_6^\Sigma p + c_7^\Sigma} \quad (37)$$

Рассматривая полиномы $\Phi_{\text{МВН}}(p)$, нетрудно заметить, что порядок астатизма системы относительно возмущающего воздействия на единицу ниже, чем порядок астатизма системы относительно управляющего воздействия $W(p)$. Относительно управляющего воздействия α_n , рассматриваемая система имеет астатизм первого порядка, тогда как относительно возмущающего воздействия (момента нагрузки $M_{\text{внк}}$) система имеет нулевой порядок астатизма, т.е. является статичной. В связи с этим рассматриваемая система будет обладать постоянной ошибкой уже при постоянном моменте нагрузки.

Заключение

В статье Буянкина В.М. "Разработка электропривода для управления сложным объектом" проделанная работа по определению передаточных функций: гироскопических устройств, электронного усилителя, электромашинного усилителя, электродвигателя, объекта управления. Прделанная работа позволяет проводить исследования динамики электропривода, рассчитывать последовательные и параллельные корректирующие устройства для улучшения качества работы электропривода.

1. Андреев В.П., Сабинин Ю.А. Основы электропривода. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963, 272 с.
2. Блейз Е.С. и др. Динамика электромашинных следящих систем. М.: Энергия. 1967. 272 с.
3. Глазенко Т.А. Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. Л.: Энергия, 1973, 304 с.
4. Проектирование следящих систем с помощью ЭВМ /Под ред. Медведева В.С. М.: Машиностроение, 1979, 159 с.
5. Иванов В.А., Медведев В.С., Чемоданов Б.К., Ющенко А.С.. Математические основы теории автоматического регулирования: в 2-х томах /Иванов В.А., В.С. Медведев, Б.К. Чемоданов, А.С. Ющенко. - М.: Высшая школа, 1977, Т.1. - 518 с.
6. Следящие приводы./Под ред. Чемоданова В.К. М.: Энергия, 1976, 285 с.