© В.Ф. Кузнецов, Со Тут Мьят Тан, 2010

УДК 622:51:.001.57

В.Ф. Кузнецов, Со Тут Мьят Тан

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА

Приведены математические модели систем управления электроприводом многомассовых электромеханических систем и структурные схемы решения дифференциальных уравнений, позволяющие синтезировать параметры регуляторов применительно к электроприводу поворота экскаватора-драглайна.

Ключевые слова: экскаватор-драглайн, многомассовая система, система управления, математическая модель, программа Matlab.

Для нелинейных одномассовых электромеханических систем и многомассовых электромеханических систем автоматизированный выбор параметров электроприводов с спосследовательной коррекцией рационально выполнять с использованием программы *Nonlinear Control Design*, входящей в программный комплекс *Matlab*. Используя метод постепенного усложнения моделируемой системы [1], рассмотрим вначале одномассовую электромеханическую систему с электроприводом постоянного тока по схеме тиристорный преобразователь-двигатель, в которой необходимо выбрать параметры регуляторов тока и скорости, обеспечивающие установленный уровень демпфирования колебаний тока якорной цепи и скорости вращения двигателя.

Как известно [2], системы подчинённого регулирования предназначены для получения заданного типа переходных характеристик электропривода путём компенсации инерционностей (запаздывания) в последовательно включённых регуляторах. Как правило, это последовательно включённые регуляторы скорости и тока, в каждом из которых существует относительно небольшая некомпенсируемая постоянная времени T_μ и основная компенсируемая постоянная времени. В качестве учебного примера возьмём систему, рассмотренную в [1].

Для контура тока T_μ выберем по формуле $T_\mu = Tm/2 = 0{,}01/2 = 0{,}005$ с, где $Tm = 0{,}01$ с – постоянная времени тиристорного преобразователя. В качестве компенсируемой постоянной времени токового контура примем электромагнитную постоянную времени электропривода $T_э = 0{,}0364$ с. Настройку регулятора тока выполним по формуле [2] $\dfrac{T_{ток}}{k_{тп} T_\mu} = a$.

Откуда следует $T_{ток} = k_{тп.}\, T_\mu\, a = 40*0{,}005*2 = 0{,}4$,

где $T_{ток}$ - постоянная времени регулятора тока, $k_{тп} = 40$ – коэффициент передачи тиристорного преобразователя; а = 2 – параметр настройки регулятора.

В итоге получаем ПИ- регулятор контура тока с передаточной функцией $W_{рт}(p) = \dfrac{0{,}0364p + 1}{0{,}4}$.

Настройку П- регулятора скорости выполним по формуле $\dfrac{T_{ск}}{k_д T_\mu 2} = a$. Откуда следует

$T_{ск} = k_д T_\mu 2a$ = 1,47*0,05*4 = =,0294,

где $T_{ск}$ - постоянная времени регулятора скорости, $k_д$ = 1,47 – коэффициент передачи двигателя по управляющему воздействию, a = 2 – параметр настройки регулятора. Коэффициент передачи П- регулятора скорости $k_{ск} = \dfrac{T_м}{T_{ск}} = \dfrac{0{,}09635}{0{,}0294}$ = 3,27, $T_м$ = 0,09635 с – электромеханическая постоянная времени электропривода.

Ограничение тока якорной цепи удвоенным значением номинального тока двигателя $2I_{ном}$ = 2*22 = 44 *А* обеспечивается введением в регулятор скорости нелинейного звена типа “ограничение координаты по модулю”. Использование П- регулятора в контуре скорости и ПИ –регулятора в контуре тока означает, что контур тока обладает астатизмом, а контур скорости остаётся статическим. Для введения астатизма по скорости в контуре скорости необходимо использовать ПИ регулятор, при этом объект управления рассматривается как инерционное звено с постоянной времени $T_м$ (электромеханическая постоянная времени электропривода).

Поскольку постоянные времени регуляторов рассчитывались применительно к одномассовой электромеханической системе, выбор параметров регуляторов для двухмассовых систем можно выполнить с помощью в автоматизированном режиме с помощью программы *Nonlinear Control Design*, причём в качестве исходных параметров регуляторов принять числовые данные приведенные выше. Компенсация большой постоянной времени $T_м$ создаёт неустойчивую работу токового контура, что приводит к необходимости использования плавного нарастания задающего сигнала в контуре скорости с ограничением равным желаемому значению скорости двигателя. Одним из способов реализации этого является использование интегратора, реализующего линейную заводку задающего сигнала, коэффициент передачи интегратора подбирается экспериментально.

Математическое описание моделируемой двухмассовой системы имеет вид:

1) $U_1 = k_0 U_0 t \le \left(\dfrac{d\varphi_{дв}}{dt}\right)_0$;

2) $m\dfrac{d}{dt}\left(U_1 - \dfrac{d\varphi_{дв}}{dt}\right) + \left(U_1 - \dfrac{d\varphi_{дв}}{dt}\right) = nU_2$;

в операторной форме

$(U_1 - \omega)\,\dfrac{mp + 1}{np} = U_2$; $|U_2| \le 2I_{ном}$;

3) $k\frac{d}{dt}(U_2 - I) + (U_2 - I) = l\frac{dU_3}{dt}$;

в операторной форме

$(U_2 - I)\frac{k\rho + 1}{l\rho} = U_3$;

4) $T_т\frac{dE_т}{dt} + E_т = k_т U_3$;

5) $E_т = IR_\Sigma + L_\Sigma\frac{dI}{dt} + C_e\frac{d\varphi_{дв}}{dt}$;

6) $J_{дв}\frac{d^2\varphi_{дв}}{dt^2} = C_м I - k_{ред}\propto$;

7) $J_{мех}\frac{d^2\varphi_{мех}}{dt^2} = \rho k_{ред}\propto + M_c$;

8) $\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\varphi_{дв}}{dt} - \rho\frac{d\varphi_{мех}}{dt}$;

9) $\propto = \varphi_{дв} - \rho\varphi_{мех} \mp \delta$,

где t – время; U_1 - линейно растущий сигнал на входе регулятора скорости; k_0 - коэффициент, определяющий скорость нарастания сигнала U_1; $\left(\frac{d\varphi_{дв}}{dt}\right)_0$ - требуемое значение скорости двигателя; $\omega = \frac{d\varphi_{дв}}{dt}$ - скорость двигателя; U_2, U_3 - сигналы на выходе регуляторов тока и скорости; m, n – параметры регулятора скорости , выбираемые программой NCD в автоматизированном режиме по методике, изложенной ниже; k, l - параметры регулятора скорости , выбираемые программой NCD в автоматизированном режиме; I - ток силовой цепи электрических машин; E_m - ЭДС на выходе тиристорного преобразователя; k_m - коэффициент передачи тиристорного преобразователя; $R_\Sigma = R_д + R_m$ - суммарное активное сопротивление силовой цепи электрических машин; $R_д; R_m$ - активные сопротивления силовых цепей двигателя и тиристорного преобразователя; $L_\Sigma = L_д + L_m$ - суммарная индуктивность силовой цепи электрических машин; $L_д; L_m$ - индуктивности силовых цепей двигателя и тиристорного преобразователя; Cе – коэффициент пропорциональности между ЭДС двигателя и скоростью; Cм - коэффициент пропорциональности между моментом двигателя и током; $J_{дв}$ - момент инерции ротора двигателя; $J_{мех}$ - момент инерции исполнительного механизма; $\varphi_{дв}$ - угол поворота ротора двигателя; $\varphi_{мех}$ - угол поворота вала исполнительного механизма $k_{ред} = \frac{k}{\rho^2}$ - приведенная к валу двигателя жёсткость валопровода; k – физическое значение жёсткости выходного (медленного) вала редуктора; ρ – передаточное отно-

шение редуктора; δ - приведенный к валу двигателя угловой кинематический зазор; M_c - момент нагрузки, приложенный к валу исполнительного механизма.

Физическая форма уравнений, соответствующая параметрам учебной двухмассовой электромеханической системы[1]:

1) $0.5 * 323.4 * t \leq 323.4$;

2) $(U_1 - \omega)\dfrac{m\rho + 1}{n\rho} = U_2$; $|U_2| \leq 44$; 3) $(U_2 - I)\dfrac{k\rho + 1}{l\rho} = U_3$;

4) $0{,}01\dfrac{dE_т}{dt} + E_т = 40 * U_3$; 5) $E_т = 0{,}55I + 0{,}02\dfrac{dI}{dt} + 0.68\dfrac{d\varphi_{дв}}{dt}$;

6) $0{,}056\dfrac{d^2\varphi_{дв}}{dt^2} = 0{,}68I - 0{,}125\,\propto$; 7) $10\dfrac{d^2\varphi_{мех}}{dt^2} = -20 * 125\,\propto + M_c$;

8) $\dfrac{d\alpha}{dt} = \dfrac{d\varphi_{дв}}{dt} + 20\dfrac{d\varphi_{мех}}{dt}$; 9) $\propto = \varphi_{дв} \mid 20\varphi_{мех}\ \top\ 0{,}1$.

Приведенным уравнениям соответствует структурная схема решения, приведенная ниже

В структурной схеме показаны результаты автоматизированного выбора параметров регуляторов скорости и тока, обеспечивающих минимальное перерегулирование по току и скорости двигателя. Оптимизация параметров регуляторов производилась в два этапа. На первом этапе оптимизации блок *NCD* , был подключён к выходу блока, формирующего сигнал на выходе регулятора скорости; в качестве стартовых значений параметров обоих регуляторов были использованы представленные выше значения параметров, рассчитанные применительно к одномассовым системам. На втором этапе оптимизации блок *NCD* был подключён к входу регулятора тока, а на регуляторе скорости были установлены значения параметров m и n, полученные на первом этапе (m = 2; n = 2,77). В результате второго этапа были получены значения параметров k и l, обеспечившие минимальную амплитуду колебаний сигнала на входе регулятора тока (k = 0,654; l = 1.7), что позволило обеспечить минимальную амплитуду колебаний тока якорной цепи и скорости двигателя. Полученные в результате моделирования новые значения параметров настройки регуляторов обеспечили приемлемое качество переходных процессов по току якорной цепи и скорости двигателя, но так же, как и в электроприводе с параллельной коррекцией, не обеспечили надёжного демпфирования колебаний в валопроводе.

После определения последовательности операций синтеза системы управления электроприводом постоянного тока с последовательной коррекцией было выполнено моделирование электромеханической системы поворота экскаватора-драглайна с учётом нелинейности характеристики тиристорного преобразователя, согласно схеме на рис. 1.

Математическое описание электропривода поворота шагающего экскаватора при идентичной работе четырёх двигателей поворота [1] и использовании двухконтурной системы подчинённого регулирования имеет вид:

1) $U_1 = k_6 U_0 t \leq \left(\dfrac{d\varphi_{дв}}{dt}\right)_0$; 2) $m\dfrac{d}{dt}\left(U_1 - \dfrac{d\varphi_{дв}}{dt}\right) + \left(U_1 - \dfrac{d\varphi_{дв}}{dt}\right) = nU_2$;

в операторной форме

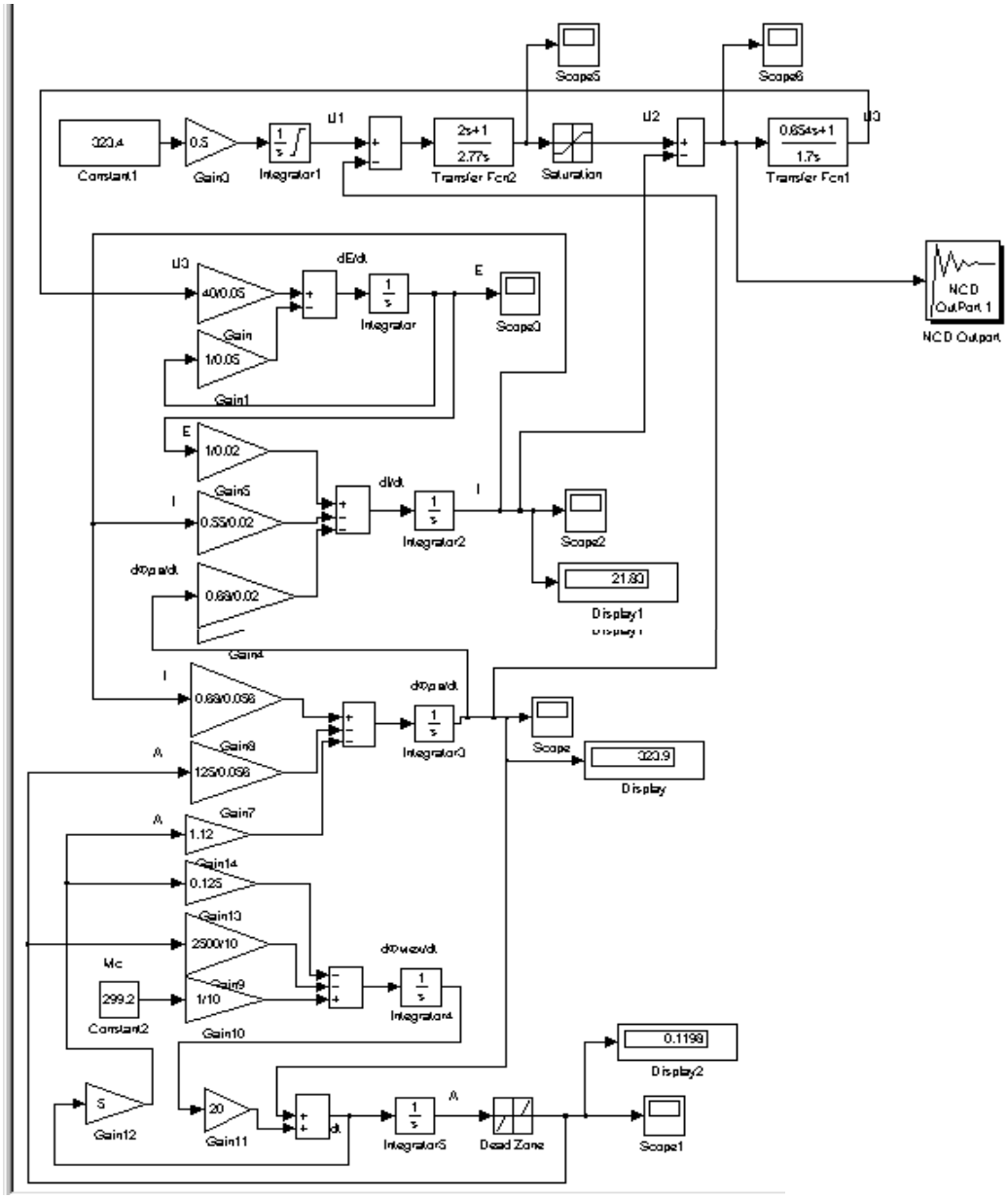

Рис. 1. Схема моделирования системы

$$(U_1-\omega)\frac{m\rho+1}{n\rho}=U_2;\ |U_2|\le 2I_{\text{ном}};\ 3)\ \ k\frac{d}{dt}(U_2-I)+(U_2-I)=l\frac{dU_3}{dt};$$

в операторной форме

$$(U_2-I)\frac{k\rho+1}{l\rho}=U_3;\ 4)\ \ U_3=f^{-1}(E_{\text{т}})+\frac{k_{\text{т}}}{k^*}\frac{dE_{\text{т}}}{dt};$$

5) $E_т = IR_\Sigma + L_\Sigma \frac{dI}{dt} + 4C_в \frac{d\varphi_{дв}}{dt}$; 6) $J_{дв} \frac{d^2\varphi_{дв}}{dt^2} = C_м I - k_{ред}\,\propto - \beta_{ред} \frac{d\alpha}{dt}$;

7) $J_{экс} \frac{d^2\Psi}{dt^2} = 4(1 - \rho_{мех}) k_{ред}\,\propto + 4\beta_{ред}(1 - \rho_{мех}) \frac{d\alpha}{dt} - M_c$;

8) $\propto = \varphi_{дв} - (1 - \rho_{мех})\Psi + \delta$,

где E_m - ЭДС на выходе тиристорного преобразователя; I - ток силовой цепи электрических машин; $U_3 = f^{-1}(E_m)$ - текущее значение управляющего сигнала на входе тиристорного преобразователя (функция обратная характеристике $E_m = f(U_3)$); $k^* = \frac{E_{m_{ном}}}{U_3}$ - статический коэффициент передачи тиристорного преобразователя по управляющему сигналу; R_Σ - суммарное активное сопротивление силовой цепи электрических машин; L_Σ - суммарная индуктивность силовой цепи электрических машин; *Се* – коэффициент пропорциональности между ЭДС двигателя и скоростью; *С*м - коэффициент пропорциональности между моментом двигателя и током; $J_{дв}$ -момент инерции ротора двигателя; $J_{экс}$ - момент инерции поворотной платформы экскаватора; $\varphi_{дв}$ - угол поворота ротора двигателя; ϕ - угол поворота вала исполнительного механизма $k_{ред}$ - приведенная к валу двигателя жёсткость валопровода; $\beta_{ред}$ - приведенный к валу двигателя коэффициент вязкого трения в валопроводе; $\rho_{мех}$ – произведение коэффициентов передачи ступеней редуктора; δ - приведенный к валу двигателя угловой кинематический зазор; M_c - момент нагрузки.

Числовые значения параметров [1] системы

$J_{дв} = 78$ кг · м^2; $J_{экс} = 601 \cdot 10^6$ кг · м^2; $\rho_{мех} = -390$; $k_{ред} = 36260 \frac{Нм}{рад}$;

$C_п = 4{,}414 \frac{Нм}{А}$; $C_в = 4{,}414 \frac{В}{рад/с}$; $R_\Sigma = 0{,}083$ Ом; $L_\Sigma = 0{,}045$ Гн; $U_{ном} = 225$ В;

$I_{ном} = 1030$ А; $M_{ном} = 4546$ Нм; $I_{ост} = 1450$ А; $I_{стоп} = 1800$ А; $\beta_{ред} = 64 \frac{Нм}{рад/с}$;

$\delta_1 = \delta_2 = 0{,}2$ рад; $R_д = 0{,}012$ Ом; $n_{ном} = 460 \frac{об}{мин}$ ($\omega_{ном} = 48{,}17$ с$^{-1}$);

$k_д = \frac{1}{4{,}414} = 0{,}227 \frac{с^{-1}}{В}$; $k_т = 40$; $T_т = 0{,}05$ с; $k^* = 4$; $U_{Зном} = 234$ В.

Физические уравнения системы имеют вид:

1) $0.8 * 234 * t \leq 323{,}4$;

2) $(U_1 - \omega)\frac{m\rho + 1}{n\rho} = U_2$; $|U_2| \leq 2060$; 3) $(U_2 - I)\frac{k\rho + 1}{l\rho} = U_3$;

4) $AW_0 = f^{-1}(E_т) + \frac{0{,}05}{4}\frac{dE_т}{dt}$;

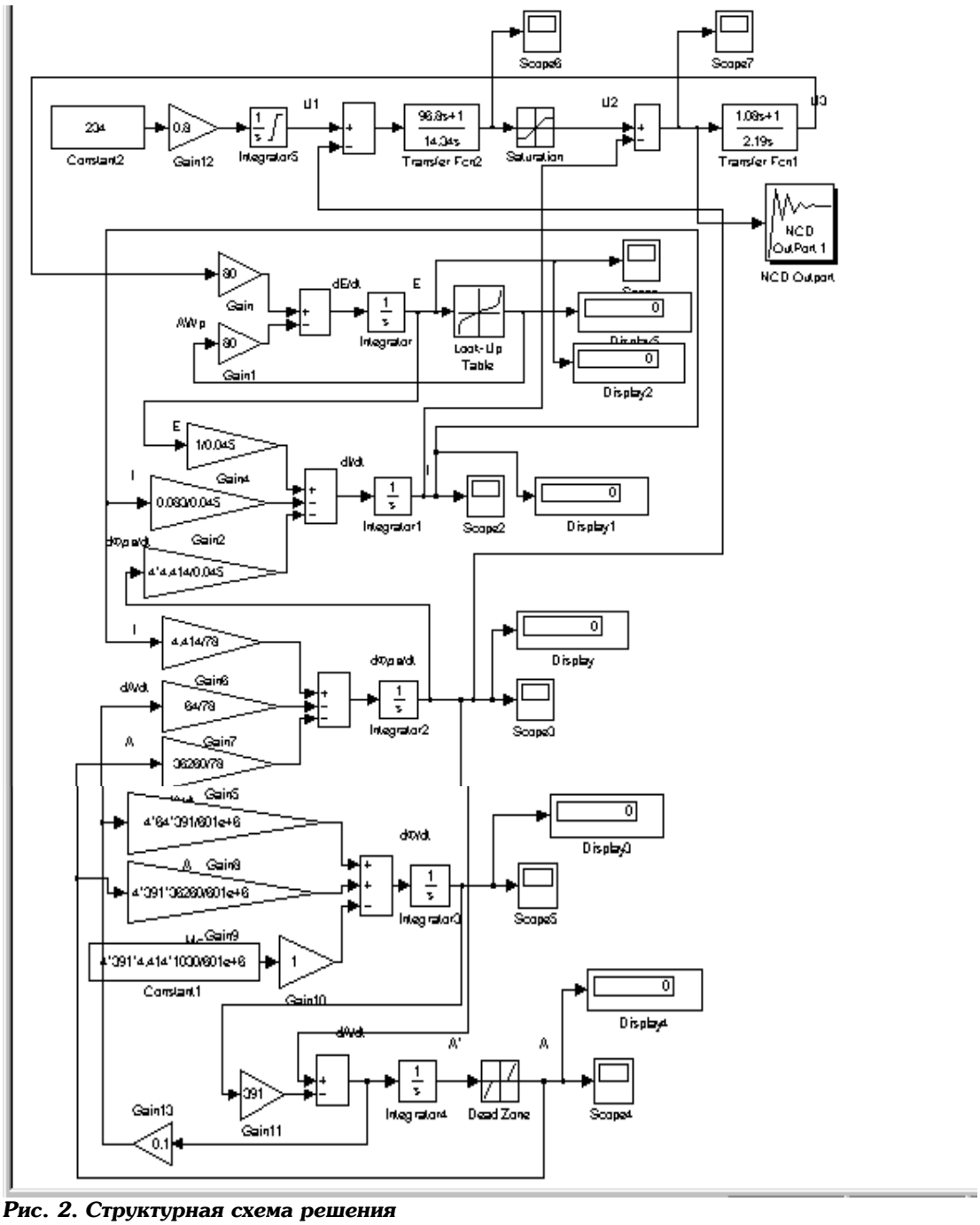

Рис. 2. Структурная схема решения

5) $E_т = 0{,}083 * I + 0{,}045\dfrac{dI}{dt} + 4 * 4{,}414\dfrac{d\varphi_{дв}}{dt}$;

6) $78\frac{d^2\varphi_{дв}}{dt^2} - 4{,}414 * I - 36260 \propto -64\frac{d\alpha}{dt}$;

7) $601 * 10^6 \frac{d^2\Psi}{dt^2} = 4 * 391 * 36260\alpha + 4 * 64 * 391\frac{d\alpha}{dt} - M_c$;

8) $\propto_1 = \varphi_{дв} + 391\varphi_{пит} \mp 0{,}2.$

Приведенным уравнениям соответствует структурная схема решения (Рис. 2), в которой показаны результаты автоматизированного выбора параметров регуляторов скорости и тока, обеспечивающих минимальное перерегулирование по току и скорости двигателя. В качестве момента нагрузки принят постоянный момент, соответствующий суммарному номинальному моменту четырёх двигателей, приведенному к оси вращения поворотной платформы экскаватора. В качестве исходных значений параметров регуляторов были приняты их значения, рассчитанные для одномассовых систем. Итоговые значения параметров, полученные с помощью программы *NCD*, указаны на структурной схеме решения и составили m = 96,8; n = 14,34; k = 1,08; l = 2,19. Полученные в результате моделирования новые значения параметров настройки регуляторов обеспечили приемлемое качество переходных процессов по току якорной цепи и скорости двигателя, но так же, как и в электроприводе с параллельной коррекцией, не обеспечили надёжного демпфирования колебаний в валопроводе. Поэтому для решения задачи демпфирования указанных колебаний в многодвигательном электроприводе, обладающем меньшей (по сравнению с однодвигательным электроприводом) демпфирующей способностью необходимо использование дополнительных средств (электрических или механических).

В схеме предусмотрено варьирование коэффициента вязкого трения $\beta_{ред}$, что позволяет производить настройку регуляторов при использовании дополнительных демпфирующих звеньев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов В.Ф.* Электромеханические системы. Примеры исследований с использованием программы *Matlab*. М., зд-во. МГГУ, 2008.

2. *Сабинин Ю.А.* Электромашинные устройства автоматики. Л., “Энергоатомиздат”, 1988. ГИАБ

Коротко об авторах

Кузнецов В.Ф. – профессор, доктор технических наук,
Со Тут Мьят Тан – аспирант,
Московский государственный горный университет,
Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru