

УДК 622.23.05

В.Ф. Кузнецов, Со Тут Мьят Тан

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОВОРОТА ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА

Представлены исследования нелинейной многодвигательной электромеханической системы электропривода поворота экскаватора-драглайна с использованием пакетов прикладных программ, входящих в программный комплекс *Matlab*. Особое внимание уделено исследованию демпфирующей способности этого привода.
Ключевые слова: многодвигательный электропривод, электромеханическая система, демпфирование.

Одной из важнейших задач, возникающих при проектировании многодвигательного электропривода экскаваторов, является повышение демпфирующей способности электропривода. Для настройки параметров электропривода экскаватора с учётом существенных нелинейностей электромеханической системы рационально использовать программу *Nonlinear Control Design*, входящую в программный комплекс *Matlab*. Исследование многодвигательного электропривода необходимо проводить в несколько этапов.

На первом этапе исследуется однодвигательный электропривод с параллельной и последовательной коррекцией. На втором этапе рассматриваются задачи, связанные с моделированием многодвигательного электропривода при идентичной работе двигателей, выбираются и обосновываются допущения, позволяющие максимально упростить математическое описание электромеханической системы, разработать методы повышения демпфирующей способности электропривода при якорном управлении двигателями.

На третьем этапе исследований рассматриваются возможности повышения демпфирующей способности многодвигательного электропривода при якорном управлении двигателями, на четвёртом этапе эта же задача решается при совместном использовании якорного и полусного способов управления.

Математическая модель однодвигательной двухмассовой электромеханической системы с управлением по схеме тиристорный преобразователь - двигатель с параллельной коррекцией, с учётом нелинейности характеристики преобразователя, нелинейности, создаваемой кинематическими зазорами редуктора и нелинейности, создаваемой жёсткой отрицательной обратной связью по току с отсечкой, имеет вид:

Итоговая система уравнений для нелинейной двухмассовой системы с обратными связями имеет вид:

$$\begin{aligned} 1) \quad AW_{рез} &= AW_{э} - AW_{ос} - AW_{тж} - AW_{нг} = \\ &= AW_{э} \left(1 + k_{т} k_{д} \left(\frac{k_{ос}}{k_{ав}} \right) \right) - k_{ос} \frac{d\varphi_{дэ}}{dt} - k_{тж} (I \mp I_{отс}) - k_{тг} \frac{dl}{dt} - k_{нг} \frac{dE_{т}}{dt}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
2) \quad AW_{рез} &= f^{-1}(E_T) + \frac{T_T}{k^*} \frac{dE_T}{dt}; \\
3) \quad E_T &= IR_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI}{dt} + C_{\varepsilon} \frac{d\varphi_{дв}}{dt}; \\
4) \quad J_{дв} \frac{d^2\varphi_{дв}}{dt^2} &= C_M I - k_{ред} \alpha - \beta_{ред} \frac{d\alpha}{dt}; \\
5) \quad J_{мех} \frac{d^2\varphi_{мех}}{dt^2} &= \rho k_{ред} \alpha + \rho \beta_{ред} \frac{d\alpha}{dt} + M_c; \\
6) \quad \frac{d\alpha}{dt} - \frac{d\varphi_{дв}}{dt} - \rho \frac{d\varphi_{мех}}{dt} &; \\
7) \quad \alpha &= \varphi_{дв} - \rho \varphi_{мех} \mp \delta,
\end{aligned}$$

где $AW_{рез}$; AW_3 - результирующий и задающий управляющие сигналы преобразователя; AW_{oc} ; $AW_{мж}$; AW_{m2} ; $AW_{н2}$ - сигналы, создаваемые отрицательными обратными связями по скорости двигателя, по току якорной цепи с отсечкой, по производным от тока I и ЭДС E_T ; k_{oc} ; $k_{мж} = m$; $k_{m2} = n$; $k_{н2} = k$ - коэффициенты передачи цепей обратной связи; $k_{ав}$ - коэффициент преобразования напряжений в ампервитки.

E_m - ЭДС на выходе тиристорного преобразователя; I - ток силовой цепи электрических машин; $AW_3 = f^{-1}(E_m)$ - текущее значение ампервитков (функция обратная характеристике $E_m = f(AW_3)$); $k^* = \frac{E_{m_{ном}}}{AW_{3_{ном}}}$ - статический ко-

эффициент передачи тиристорного преобразователя по ампервиткам, необходимый для перехода от переменной AW_3 к переменной E_T ; $R_{\Sigma} = R_{\partial} + R_m$ -

суммарное активное сопротивление силовой цепи электрических машин; R_{∂} ; R_T - активные сопротивления силовых цепей двигателя и тиристорного преобразователя; $L_{\Sigma} = L_{\partial} + L_m$ - суммарная индуктивность силовой цепи электрических машин; L_{∂} ; L_m - индуктивности силовых цепей двигателя и тиристорного преобразователя; C_{ε} - коэффициент пропорциональности между ЭДС двигателя и скоростью; C_M - коэффициент пропорциональности между моментом двигателя и током; J_{∂} - 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 жёстко-

сти выходного (медленного) вала редуктора; $\beta_{ред} = \frac{\beta}{\rho^2}$ - приведенный к валу

двигателя коэффициент вязкого трения в валопроводе; β - физическое значение коэффициента вязкого трения в упругом звене валопровода, представляющем собой выходной (медленный) вал редуктора; ρ - передаточное отношение редуктора.

Кинематический зазор в зубчатой передаче редуктора воспроизводится при моделировании с помощью нелинейного звена типа "зона нечувствительности". При этом выражение для угла деформации валопровода приобретает вид:

$$\alpha = \varphi_{дв} - \rho\varphi_{мех} \mp \delta$$

где знаки \mp - обозначение нелинейности указанного типа; δ - приведенный к валу двигателя угловой кинематический зазор; M_c - момент нагрузки, приложенный к валу исполнительного механизма.

Коэффициенты m , n , k выбираются автоматически с помощью блока *NCD* программы *Nonlinear Control Design*, подключаемого к выходу блока модели, возвращающего переходную характеристику системы по току якорной цепи I . В рабочем окне блока *NCD* с помощью ограничительных линеек устанавливается форма переходной характеристики по току I ; в соответствии с этими ограничениями программа *NCD* возвращает значения коэффициентов m , n , k . В процессе моделирования второй блок *NCD* подключался к выходу блока модели, возвращающего переходную характеристику системы по деформации валопровода A .

Одновременная оптимизация переходных характеристик по току и деформации валопровода выявляет возможности обратных связей электропривода по демпфированию колебаний в валопроводе. Существенное уменьшение размаха колебаний в валопроводе сопровождается увеличением коэффициента k (глубины гибкой отрицательной обратной связи по ЭДС), что приводит к замедлению темпа нарастания ЭДС тиристорного преобразователя, и затягиванию времени переходного процесса. Дальнейшее снижение динамических нагрузок в валопроводе может быть достигнуто увеличением коэффициента вязкого трения в валопроводе. Для реализации этого способа необходимо введение дополнительных механических демпфирующих средств.

Задача повышения демпфирующей способности электропривода приобретает ещё большее значение и актуальность в многодвигательном электроприводе, который обладает способностью к образованию противофазных колебаний в валопроводах редукторов. Поскольку сумма колебательных составляющих угловых деформаций в валопроводах близка к нулю, система управления электроприводом при последовательном соединении двигателей не может гасить колебаний в отдельных валопроводах, а в отдельных случаях может способствовать увеличению амплитуды этих колебаний [1].

Расчётная схема механизма поворота шагающего экскаватора включает в себя четыре идентичных двигателя поворота, каждый из которых через трёхступенчатый редуктор вращает свою венцовую шестерню, обкатывающуюся вокруг неподвижного зубчатого венца. Образующая планетарная зубчатая передача приводит во вращение поворотную платформу экскаватора, на кото-

рой установлено рабочее оборудование, в том числе двигатели и редуктора электропривода поворота. Расчётная схема электрической части содержит четыре последовательно соединённых двигателя постоянного тока, питаемых от силового тиристорного преобразователя с суммирующим элементом на входе.

Математическая модель многодвигательного электропривода поворота шагающего экскаватора строится на основе ряда допущений, важнейшими из которых являются следующие:

1. Четыре двигателя механизма поворота работают попарно идентично. В результате этого допущения четырёхдвигательный электропривод сводится к двухдвигательному – простейшему виду многодвигательного привода.

2. Поскольку суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции промежуточных зубчатых колёс редуктора составляет менее 10 процентов от момента инерции ротора двигателя, маховыми массами этих зубчатых колёс пренебрегаем. Данное допущение объясняется тем, что маховые массы звеньев кинематической цепи редуктора определяются с погрешностью порядка 10 процентов. В результате этого допущения каждый валопровод сводится к двухмассовой (а не к четырёхмассовой) системе.

3. Момент инерции поворотной платформы принимаем постоянным. При этом считаем, что ковш загружен наполовину, а его вылет составляет $2/3$ от длины стрелы. В результате этого допущения получаем систему уравнений с постоянными (а не переменными) коэффициентами. Данное допущение объясняется тем, что скорость перемещения ковша по стреле намного меньше скорости колебаний в валопроводах.

4. Стрелу экскаватора считаем абсолютно жёсткой, поскольку частота колебаний стрелы намного меньше частоты колебаний в валопроводе.

5. Колебаниями ковша на бифилярном подвесе (подъёмные и тяговые канаты) пренебрегаем, поскольку частота этих колебаний намного меньше частоты колебаний в валопроводе.

6. Момент силы трения, создаваемый при вращении поворотной платформы, считаем постоянным по величине, равным 0,1 от суммарного стопорного момента двигателей поворота (приведенного к оси вращения платформы) и направленным против скорости вращения платформы.

7. Считаем, что суммарные кинематические зазоры, приведенные к валу двигателя, равны по величине в обоих валопроводах, но в одном из валопроводов в начале разгона поворотной платформы существует максимальный зазор, а во втором – минимальный (нулевой зазор). Данное допущение позволяет воспроизвести наиболее тяжёлый режим работы, поскольку противофазные колебания в валопроводах возникают в начальный момент пуска электропривода.

8. Диссипативные силы в каждом из валопроводов считаем пропорциональными первой степени скорости деформации валопроводов.

9. Параметры кинематических цепей обоих валопроводов (моменты инерции и жёсткости) считаем идентичными.

10. Схема управления содержит пять управляющих сигналов (при магнитном суммировании пять обмоток управления, ампервитки которых суммируются). Один сигнал является задающим, остальные четыре используются для двух жёстких и двух гибких обратных связей (пропорциональный регулятор).

11. Экскаваторная механическая характеристика формируется жёсткой отрицательной обратной связью по напряжению генератора и жёсткой отрицательной обратной связью по току якорной цепи с отсечкой.

12. Рассматривается только якорное управление двигателями.

13. Рассматривается только период пуска двигателей.

14. Реакция якоря в электрических машинах не рассматривается.

С учётом принятых допущений полное математическое описание многодвигательной электромеханической системы имеет вид

$$1) AW_{\text{рез}} = AW_{\Sigma} - AW_{\text{ог}} - AW_{\text{тж}} - AW_{\text{нг}} =$$

$$= AW_{\Sigma} \left(1 + k_{\tau} k_{\text{д}} \left(\frac{k_{\text{ог}}}{k_{\text{ав}}} \right) \right) - k_{\text{ог}} \frac{d\varphi_{\text{дв}}}{dt} - k_{\text{тж}} (I \mp I_{\text{отс}}) - k_{\text{тр}} \frac{dI}{dt} - k_{\text{нг}} \frac{dE_{\tau}}{dt};$$

$$2) AW_{\text{рез}} = f^{-1}(E_{\tau}) + \frac{k_{\tau}}{k^*} \frac{dE_{\tau}}{dt};$$

$$3) E_{\tau} = IR_{\Sigma} + L_{\Sigma} \frac{dI}{dt} + 2 \cdot C_{\varepsilon} \left(\frac{d\varphi_{\text{дв}1}}{dt}, \frac{d\varphi_{\text{дв}2}}{dt} \right);$$

$$4) J_{\text{дв}} \frac{d^2 \varphi_{\text{дв}1}}{dt^2} = C_{\text{м}} I - k_{\text{ред}} \alpha_1 - \beta_{\text{ред}} \frac{d\alpha_1}{dt};$$

$$5) J_{\text{дв}} \frac{d^2 \varphi_{\text{дв}2}}{dt^2} = C_{\text{м}} I - k_{\text{ред}} \alpha_2 - \beta_{\text{ред}} \frac{d\alpha_2}{dt};$$

$$6) J_{\text{экс}} \frac{d^2 \Psi}{dt^2} = 2(1 - \rho_{\text{мех}}) k_{\text{ред}} (\alpha_1 + \alpha_2) + 2\beta_{\text{ред}} (1 - \rho_{\text{мех}}) \left(\frac{d\alpha_1}{dt} + \frac{d\alpha_2}{dt} \right) - 0,1 \cdot 4 \cdot (1 - \rho_{\text{мех}}) C_{\text{м}} I_{\text{стоп}} \cdot \text{Sgn} \frac{d\Psi}{dt};$$

$$7) \alpha_1 = \varphi_{\text{вр}1} - (1 - \rho_{\text{мех}}) \Psi \mp \delta_1;$$

$$8) \alpha_2 = \varphi_{\text{дв}2} - (1 - \rho_{\text{мех}}) \Psi \mp \delta_2;$$

где в качестве обобщённых координат приняты: углы поворота роторов первого и второго двигателей и угол поворота поворотной платформы экскаватора $\varphi_{\text{дв}1}$,

$\varphi_{\text{дв}2}$, Ψ ; $J_{\text{дв}}$ - момент инерции ротора двигателя; $J_{\text{экс}}$ - момент инерции по-

воротной платформы экскаватора; $\rho_{\text{мех}} = \rho_1 \rho_2 \rho_3$ - передаточное число редуктора, равное произведению передаточных чисел трёх ступеней зубчатой передачи;

$\delta_1; \delta_2$ - приведенные к валу двигателя суммарные кинематические зазоры в обо-

их валопроводах; $C_{\text{м}} I_{\text{стоп}}$ - стопорный момент двигателя; $(1 - \rho_{\text{мех}}) C_{\text{м}} I_{\text{стоп}}$ -

стопорный момент двигателя, приведенный к оси вращения поворотной плат-

формы; $\text{Sgn} \frac{d\Psi}{dt}$ - знак скорости вращения поворотной платформы.

Анализ осциллограмм переходных процессов для тока I , деформаций валопроводов A_1 и A_2 , суммы деформаций $A_1 + A_2$ показывает: колебания переменных A_1 и A_2 в обоих валопроводах протекают в противофазе; в валопроводе первого редуктора возникает многократное образование кинематических зазоров, вследствие чего динамические нагрузки в валопроводе значительно возрастают. Ампли-

туда колебаний суммы $A_1 + A_2$ значительно меньше амплитуд колебаний отдельных слагаемых A_1 и A_2 ; колебания тока I практически отсутствуют, поскольку величина тока (в соответствии с уравнением якорной цепи) зависит от суммы скоростей двигателей, колебательная составляющая которой мала (вследствие того, что колебания скоростей также протекают в противофазе). Из сказанного следует, что при последовательном соединении двигателей демпфирующая способность многодвигательного привода значительно уменьшается по сравнению с однодвигательным приводом.

Приведенные данные наглядно подтверждают принципиально важную особенность многодвигательных электромеханических систем: появление в этих системах новых явлений и свойств по сравнению со свойствами отдельно однодвигательных систем. К числу таких явлений относится взаимодействие динамических процессов в валопроводах многодвигательного электропривода, сопровождаемое многократным образованием кинематических зазоров. Поскольку в результате значительно увеличиваются динамические нагрузки в валопроводах тяжёлых машин, что ведёт к сокращению срока службы редукторов, возникает задача разработки технических средств (как механических, так и электрических), позволяющих повысить демпфирующие свойства электропривода.

В качестве таких средств могут быть использованы: введение в валопроводы редукторов дополнительных упруго-демпфирующих звеньев; введение демпфирующих обратных связей в схемы управления напряжением возбуждения двигателей; питание якорных цепей каждого двигателя от отдельного источника напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Кузнецов В.Ф. Электромеханические системы. – М.: Изд-во МГТУ, 2008.
- 2 Дьяконов В.П. *Simulink 4*, СПб.: изд-во "Питер", 2002. **П****И****Т****Е****Р**

Коротко об авторах

<p>Кузнецов В.Ф. – доцент, Со Тут Мьят Тан – аспирант, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru</p>
--

