

УДК 621(075.8)

# МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СТРУГОВОЙ УСТАНОВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЕТОВ В НЕЙРОСЕТЕВОМ БАЗИСЕ

**Л.П. Волкова**

*Научно-исследовательский и технологический университет «МИСиС»*

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 6

E-mail: [Volkova\\_LP@mail.ru](mailto:Volkova_LP@mail.ru)

**Ключевые слова:** структура управления, струговые установки, динамика, электромеханическая система, математическая модель, трехмассовая расчетная схема, нейронные сети.

**Аннотация:** Описана структура оптимальной системы управления технологическим процессом выемки угля для снижения динамических нагрузок в электромеханической системе струговых установок, полученная в результате теоретического синтеза. Приведено математическое описание трехмассовой эквивалентной схемы динамической системы струговой установки, дано краткое представление результатов исследований основанных на нем моделей. Приводятся аргументы в пользу необходимости разработки модели в нейросетевом базисе для возможности распараллеливания процессов с целью увеличения быстродействия для исследования динамики оптимальной структуры управления электроприводом струговой установки. Описана математическая модель динамической системы в нейросетевом базисе и результаты ее тестирования.

## 1. Введение

Технологический процесс выемки угля при помощи струговых установок характеризуется высокой динамичностью. Благодаря наличию протяженных упругих связей (ветвей струговой цепи) в электромеханической системе струговых установок создаются условия для возникновения колебаний. Амплитуды колебаний деформации упругих элементов могут достигать опасных значений, что сопровождается срезанием предохранительных штифтов или разрывом струговой цепи. Поэтому необходимо формирование такого закона управления режимами работы струговых установок, которое способствует снижению их динамичности. Это возможно за счет применения регулируемого электропривода с системой управления, структура которой получена в результате синтеза с достижением технического оптимума в контурах регулирования токов электродвигателей привода струга, и упругого момента в рабочей ветви струговой цепи [1]. При этом система строится как единая структура путем соподчиненного регулирования приведенных упругих моментов нагрузки ветвей цепи. В этой структуре для каждого привода струговой установки, основного и вспомогательного, используется двухконтурное подчиненное управление по току и упругому моменту. Внешним контуром всей системы управления является контур регулирования скорости исполнительного органа струговой установки. В качестве регуляторов тока и упругого момента в подсистемах

основного и вспомогательного приводов применяются ПИ-регуляторы, а регулятор скорости исполнительного органа является пропорциональным.

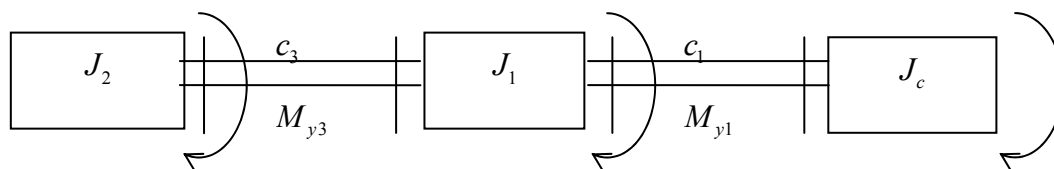
Для исследования динамики функционирования такого сложного технического объекта могут использоваться математические модели, которые позволяют снизить затраты на экспериментальную проверку принимаемых проектных решений. Для варианта регулируемого электропривода постоянного тока была разработана аналоговая модель [2], с помощью которой получены диаграммы переходных процессов в элементах электромеханической системы. По результатам моделирования установлена адекватность этой модели путем сравнения с результатами промышленных испытаний экспериментального образца.

Задача снижения динамических нагрузок становится еще более актуальной при рассмотрении перспектив развития комплексов для безлюдной выемки угля, поскольку в этом случае необходимо создание не только роботизированных, но и интеллектуальных систем для слежения за ходом технологического процесса выемки угля в сложных горно – геологических условиях. Разработка таких систем связана с необходимостью применения вычислительной техники и микроконтроллеров в контурах управления. Поэтому была поставлена и решена задача разработки цифровой модели электромеханической системы струговой установки [3].

## 2. Характеристика объекта моделирования

Электромеханическая система современных струговых установок обычно включает в себя два электродвигателя с редукторами и приводными звездочками, связанными между собой и с исполнительным органом (стругом) ветвями тяговой цепи. При исследовании динамики электромеханической системы струговых установок прибегают к некоторой идеализации, принимая целый ряд допущений. В расчетной схеме учитывают деформацию растяжения цепи, но упругим моментом в холостой ветви цепи за стругом пренебрегают, поскольку в практике такой случай встречается наиболее часто. Кроме того, пренебрегают деформацией кручения валов двигателей и деформацией изгиба зубьев шестерен редукторов и звезд [2,3]. Электромеханическая система струговых установок, с учетом допущений, в этом случае может быть представлена в виде приведенной эквивалентной трехмассовой расчетной схемы, состоящей из трех сосредоточенных масс (двух приводов и струга), обладающих моментами инерции и соединенных между собой упругими звеньями ветвей струговой цепи (рис. 1).

Все допущения применимы для электромеханической системы струговых установок при условии поддержания заданного уровня натяжения цепи [3].



**Рис. 1.** Эквивалентная трехмассовая расчетная схема электромеханической системы струговой установки.

Для малых перемещений исполнительного органа на средних участках лавы коэффициент жесткости рабочей ветви цепи можно считать неизменным. Тогда без

учета диссипативных потерь в системе эквивалентной трехмассовой расчетной схеме будет соответствовать следующее математическое описание [3]:

$$M_1 - M_{y1} + M_{y3} = J_1 * \ddot{\varphi}$$

$$M_2 - M_{y3} = J_2 * \ddot{\varphi}_2$$

$$M_{y1} - M_c = J_c * \ddot{\varphi}_c$$

$$M_{y1} = c_1 * (\varphi_1 - \varphi_c)$$

$$M_{y3} = c_3 * (\varphi_2 - \varphi_1)$$

где  $J_1, J_2, J_c$  — приведенные к угловой скорости вала двигателя моменты инерции приводов и струга,  $\text{Нм}^2$ ;  $c_1, c_3$  — приведенные коэффициенты жесткости соответственно рабочей и обратной ветвей струговой цепи,  $\text{Нм/рад}$ ;  $M_1, M_2$  — электромагнитные моменты двигателей соответственно основного и вспомогательного приводов струговой установки,  $\text{Нм}$ ;  $M_{y1}, M_{y3}$  — приведенные упругие моменты соответственно рабочей и обратной ветвей цепи,  $\text{Нм}$ ;  $M_c$  — приведенный к валу двигателя момент сопротивления,  $\text{Нм}$ ;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_c$  — угловые координаты перемещения приводов и струга, приведенные к угловой скорости вала двигателя, рад.

Математическая модель для исследования динамики и процессов управления электромеханической системой струговой установки, дополненная уравнениями электрических параметров электропривода, представляет собой систему дифференциальных уравнений 2-ого порядка [3, 4]. Решение данной системы уравнений осуществлялось методом Рунге–Кутты 4-го порядка. В качестве среды реализации программного обеспечения была выбрана система визуального объектно-ориентированного программирования Delphi 7.0. Результаты исследования режимов электропривода струга на цифровой модели и сравнение их с результатами исследования на аналоговой модели показали адекватность полученной цифровой модели. Однако попытки реализовать на цифровой модели структуру многоконтурной системы управления регулируемым электроприводом струговой установки, полученную в результате синтеза и приведенную в [1,2], не увенчались успехом. При замыкании контуров регулирования токов электродвигателей и скорости исполнительного органа переходные процессы становились расходящимися.

Поскольку приведенная модель должна воспроизводить управляемую динамическую систему вместо натуральных экспериментов с последней, целесообразно исследовать возможность ее реализации с использованием архитектуры вычислительных устройств с параллельной организацией обработки информации. В этой связи представляют интерес результаты применения численных методов решения дифференциальных уравнений к нейросетевому базису, которые представляют некоторый опыт в конструировании параллельных алгоритмов [5]. Тот факт, что математические модели нейросетевых вычислений, создавая возможность организации параллельной работы многих вычислительных элементов (формальных нейронов), позволяют добиваться требуемого быстродействия при управлении динамическими системами, подчеркивается и в работах авторов, результаты которых приведены в [6]. Кроме того, дополнительным аргументом необходимости использования расчетов в нейросетевом базисе являются отмечаемые в этих работах возможности нейронных сетей при управлении нелинейными объектами. В реальной струговой установке жесткость цепи зависит от длины основной ветви цепи между стругом и основным приводом, в сторону которого он движется. Это приводит к срезанию предохранительных элементов или разрыву струговой цепи. При исследовании на цифровой модели режимов работы струговых установок эксперименты проводились при фиксированных значениях жесткости основной ветви струговой

цепи. Амплитуды колебаний тока двигателя основного привода и упругого момента в рабочей ветви цепи на коротких ее длинах увеличиваются, переходные процессы становятся расходящимися [4]. С применением нейросетевого базиса появляется возможность моделировать эту нелинейную зависимость и исследовать ее влияние на переходные процессы в модели электромеханической системы с оптимальной структурой управления, полученной в результате теоретического синтеза [1,2].

### 3. Преобразование модели разомкнутой системы для решения в нейросетевом базисе

Исходная математическая модель разомкнутой электромеханической системы струговой установки путем ряда преобразований может быть представлена в виде нормальной системы дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{n1} &= -\frac{1}{T_{n1}} E_{n1} + \frac{K_{n1} U_{y1}}{T_{n1}}, \quad \dot{E}_{n2} = -\frac{1}{T_{n2}} E_{n2} + \frac{K_{n2} U_{y2}}{T_{n2}}, \\ \dot{I}_{я1} &= \frac{1}{L_{я1}} E_{n1} - \frac{R_{я1}}{L_{я1}} I_{я1} - \frac{C_{\partial 1}}{L_{я1}} x, \quad \dot{I}_{я2} = \frac{1}{L_{я2}} E_{n2} - \frac{R_{я2}}{L_{я2}} I_{я2} - \frac{C_{\partial 2}}{L_{я2}} y, \\ \dot{\varphi}_1 &= x, \quad \dot{\varphi}_2 = y, \quad \dot{\varphi}_c = z, \\ \dot{x} &= \frac{C_{\partial 1}}{J_1} I_{я1} - \frac{(c_1 + c_3)}{J_1} \varphi_1 + \frac{c_3}{J_1} \varphi_2 + \frac{c_1}{J_1} \varphi_c, \\ \dot{y} &= \frac{C_{\partial 2}}{J_2} I_{я2} + \frac{c_3}{J_2} \varphi_1 - \frac{c_3}{J_2} \varphi_2, \quad \dot{z} = \frac{c_1}{J_c} \varphi_1 - \frac{c_1}{J_c} \varphi_c - \frac{M_c}{J_c}. \end{aligned}$$

Здесь, дополнительно к вышеперечисленным переменным, обозначены следующие переменные:  $E_{n1}, E_{n2}$  — эдс преобразователей, В;  $I_{я1}, I_{я2}$  — токи якорных цепей, А;  $U_{y1}, U_{y2}$  — входные напряжения преобразователей, В;  $K_{n1}, K_{n2}$  — коэффициенты усиления преобразователей;  $T_{n1}, T_{n2}$  — постоянные времени преобразователей, с;  $R_{я1}, R_{я2}$  — активные сопротивления цепей выпрямленных токов, Ом;  $L_{я1}, L_{я2}$  — индуктивности цепей выпрямленных токов, Гн;  $C_{\partial 1}, C_{\partial 2}$  — коэффициенты эдс электродвигателей, В•с.

Решение системы методом Рунге-Кутты четвертого порядка имеет вид [5]:

$$(1) \quad Y_{i+1} = B \cdot Y_i = (E + h \cdot A + 0.5 \cdot h^2 \cdot A^2 + \frac{1}{6} \cdot h^3 \cdot A^3 + \frac{1}{24} \cdot h^4 \cdot A^4) \cdot Y_i$$

$$(2) \quad B = E + h \cdot A + 0.5 \cdot h^2 \cdot A^2 + \frac{1}{6} \cdot h^3 \cdot A^3 + \frac{1}{24} \cdot h^4 \cdot A^4,$$

где  $A$  — квадратная матрица постоянных коэффициентов размера  $n \times n$ ;  $Y$  — вектор искомой функции;  $E$  — единичная матрица размера  $n \times n$ ;  $h$  — шаг интегрирования.

Элементы матрицы  $B$  есть первые пять членов разложения матричной экспоненты аргумента  $hA$  в степенной ряд. Произведение вектора  $Y_i$  на разложение этой экспоненты в степенной ряд Маклорена и есть взвешенное суммирование. Матрица  $B$  полностью удовлетворяет нейросетевому базису и определяет схему решения исходной системы уравнений. Количество нейронов зависит от количества уравнений в системе. Выходом сети являются сигналы  $y_1, y_2 \dots y_n$ . Входные сигналы  $g_{10} \dots g_{n0}$  вводят в нейроны начальное возбуждение, эквивалентное начальным условиям решения системы уравнений. Функция активации у всех нейронов — симметричная линейная функция. В каждом

конкретном случае разработчик должен ввести лишь конкретные значения коэффициентов  $a_{ij}$ , и затем вычислить коэффициенты  $b_{ij}$  [5]. Зная конкретные значения постоянных коэффициентов в матрице  $A$  и начальные значения  $Y_0$ , и применяя операции возведения матриц в степень, умножение матриц на число, сложение матриц, согласно выражению (1) можно получать решения системы. В качестве среды реализации программного обеспечения была выбрана система визуального объектно-ориентированного проектирования Delphi 7.0.

## 4. Заключение

Результаты тестирования сравнивались с результатами, полученными на предыдущих моделях, и позволили судить об адекватности этой модели. Поскольку точность решения системы исходной системы уравнений определяется точностью установки коэффициентов синаптической связи, как отмечается в [5], а не числом используемых нейронов, целесообразно использовать эту методологию для построения модели замкнутой системы управления, в том числе и с учетом изменения коэффициента  $c_1$  при движении струга.

## Список литературы

1. Волкова Л.П. Новые подходы для синтеза системы управления электроприводом струговой установки // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. 2004. С. 94-97.
2. Волкова Л.П. Измерение труднодоступных координат при управлении электроприводом струга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 10. С. 291–294.
3. Волкова Л.П. Цифровая модель для исследования динамики струговых установок // Обзорение прикладной и промышленной математики. Т. 16. 2009. № 3. С. 208–21-0.
4. Волкова Л.П. Исследование динамики струговых установок на модели в условиях переменной жесткости рабочей ветви цепи // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № ОВ6. С. 552–566.
5. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002, 320 с.
6. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления. М.: Высшая школа, 2002, 183 с.