

УДК 621.798.426-52

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

**RESEARCH OF DYNAMICS
OF A CONTROLLED ELECTROTECHNICAL COMPLEX**

*А.Е. ПОЛЯКОВ, К.А. ПОЛЯКОВ, В.А. ДУБОВИЦКИЙ, Е.М. МАКСИМОВА,
Т.П. БОРДОВСКАЯ, Н.К. ПАВЛОВ*
*A.E. POLJAKOV, K.A. POLJAKOV, V.A. DUBOVITSKY, E.M. MAKSIMOVA,
T.P. BORDOVSKAJA., N.K. PAVLOV*

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)
(Moscow State Textile University "A.N. Kosygin")
E-mail: office@msta.ac.ru

Исследуются динамические свойства электропривода наматывающего устройства с применением современных методов и технологий.

Dynamic properties of the electric drive of the winding device are studied using modern methods and technologies.

Ключевые слова: электропривод, двухмассовая система, нейроконтроллер, генетические алгоритмы.

Keywords: an electric drive, two-mass system, neural controller, genetic algorithms.

Электропривод наматывающего устройства представляет сложную взаимосвязанную электромеханическую систему. Для анализа динамики управляемого комплекса необходимо составить математическое описание механической части, электромеханического преобразователя энергии и системы управления.

Стремление повысить быстродействие электропривода (ЭП), а также снизить его массогабаритные показатели приводит к тому, что при анализе динамики необходимо учитывать упругие элементы и зазоры в передачах.

Маховые массы, разделенные зазором и упругим элементом, приведены к валу двигателя. В результате все маховые массы привода сведены к двум, одна из которых жестко связана с двигателем и обладает моментом инерции J_1 , другая – отделена от двигателя зазором и упругим элементом и обладает моментом инерции J_2 . Механическая часть привода наматывающего устройства приведена на рис. 1 (двухмассовое механическое звено электропривода с упругим элементом и зазором).

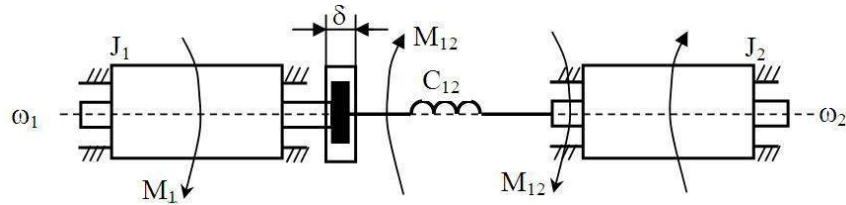


Рис. 1

Если в механическом звене отсутствуют зазоры и потери, то оно представляет собой линейную колебательную систему. Для математического описания движения системы упругий элемент мысленно разделяют, а к маховым массам прикладывают равный и противоположно направленный момент в упругом элементе (M_{12}). Тогда согласно расчетной схеме уравнения движения получают вид [1]:

$$M_1 - M_{12} = J_1 \frac{d^2\phi_1}{dt^2}, \quad (1)$$

$$M_{12} - M_c = J_2 \frac{d^2\phi_2}{dt^2}, \quad (2)$$

где M_1 – электромагнитный момент двигателя; M_c – момент сопротивления нагрузки;

$$M_{12} = C_{12}\Delta\varphi = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2); \quad (3)$$

φ_1, φ_2 – углы поворота на концах упругого элемента; C_{12} – коэффициент упругости.

Из (1) и (2) можно определить записанное относительно деформации $\Delta\varphi$ следующее выражение:

$$d^2\Delta\varphi/dt^2 + (2\Omega_{12}^2)\Delta\varphi = M/J_1 + M_c/J_2, \quad (4)$$

где $\Omega_{12} = \sqrt{C_{12}(J_1 + J_2)/(J_1J_2)}$ – частота свободных колебаний; $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$ – коэффициент соотношения моментов инерции двигателя (J_1) и механической передачи (J_2).

Если с частотой Ω_{12} на систему будет воздействовать внешнее возмущение, то возникнет явление резонанса, при котором амплитуда колебаний будет неограничен-

но возрастать. При этом сухое трение демпфирует только такие колебания, в которых скорость изменяет свой знак. Вязкое трение будет оказывать демпфирующее действие. Это трение возникает при работе вращающихся элементов в жидкой или воздушной среде. В упругом элементе при переменных деформациях возникает явление упругого гистерезиса, когда нарушается определяемая законом Гука однозначная зависимость усилия от деформации.

В случае, когда зазор δ_m выбран и маховые массы, связанные упругим элементом, движутся совместно, справедливо выражение:

$$M_{12} = C(\varphi_1 - \varphi_2 - \delta_m/2),$$

то есть когда $|\varphi_1 - \varphi_2| > \delta_m/2$.

Если $|\varphi_1 - \varphi_2| \leq \delta_m/2$, то в системе появляется зазор и $M_{12} = 0$, при этом маховые массы движутся раздельно. Так как при наличии зазора отсутствует деформация в упругом элементе, то его демпфирующий момент вязкого трения равен нулю.

Совместное решение уравнений (1)...(3) и (4) при исходных данных, приведенных в табл. 1, показало следующее. Прямой пуск разомкнутой системы на номинальную скорость сопровождается выбросами момента двигателя и упругого момента передачи за допустимые значения, причем САР при выбранном наборе параметров работает в автоколебательном режиме. Наличие зазора в передачах приводит к росту максимума упругого момента (рис. 2 – прямой пуск двухмассовой ЭМС без зазора, рис. 3 – прямой пуск двухмассовой ЭМС с зазором).

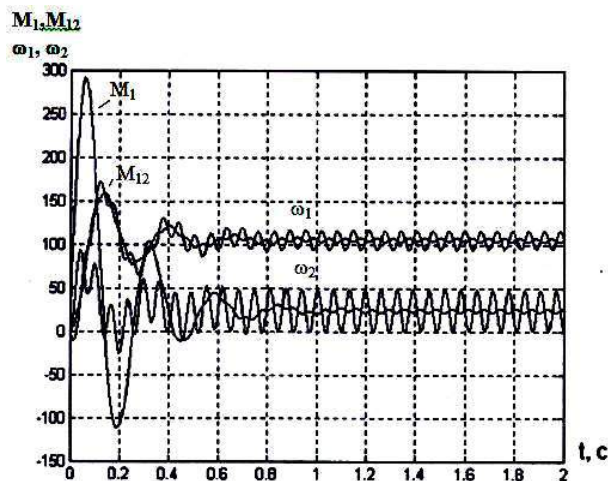


Рис. 2

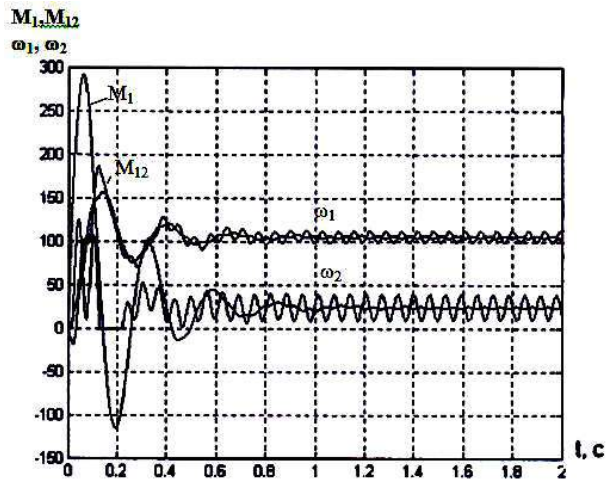


Рис. 3

Т а б л и ц а 1

β , Нмс	T_3 , с	J_1 , кгм ²	J_2 , кгм ²	C_{12} , Нм	$M_H=M_C$, Нм	$\Delta\varphi$, с ⁻¹	γ	δ_m	Ω_{12} , с ⁻¹
0,55	0,0978	0,125	0,25	90,0	38,0	0,1÷0,5	3,0	1,0	4,8

Динамические свойства двухмассовой ЭМС исследованы по структурной схеме механической части, приведенной на рис. 4.

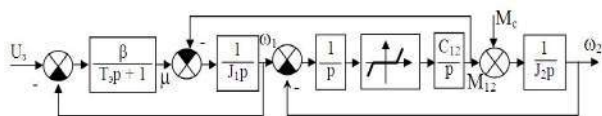


Рис. 4

Электромеханическую постоянную времени двигателя обозначим:

$$T_{M1} = J_1/\beta,$$

где β – электромеханическая жесткость.

По структурной схеме характеристическое уравнение имеет вид:

$$T_3 J_1 J_2 p^4 + J_1 J_2 p^3 + (T_3 C_{12} J_1 + T_3 C_{12} J_2 + \beta J_2) p^2 + (C_{12} J_1 + C_{12} J_2) p + C_{12} \beta = 0,$$

где T_3 – электромагнитная постоянная времени двигателя.

С учетом $\Omega_{1,2}$, T_{M1} , γ характеристическое уравнение может быть записано следующим образом:

$$\frac{\gamma T_{M1} T_3}{\Omega_{12}^2} p^4 + \frac{\gamma T_{M1}}{\Omega_{12}^2} p^3 + \gamma \left(T_{M1} T_3 + \frac{1}{\Omega_{12}^2} \right) p^2 + \gamma T_{M1} p + 1 = 0. \quad (5)$$

Анализ полученного выражения показывает, что электропривод способствует демпфированию колебаний, возникающих в механической части. В уравнении отсутствуют чисто мнимые корни, а следовательно, и демпфирование зависит от параметров, входивших в характеристическое уравнение. В процессе работы ЭМС параметры T_{M1} и T_3 остаются неизменными, а γ

и Ω_{12} могут изменяться в некоторых пределах за счет изменения момента инерции нагрузки J_2 . Параметры T_{M1} и T_3 можно выбирать при проектировании и наладке. Уравнение (5) позволяет определить оптимальные настроечные параметры, обеспечивающие в заданном диапазоне варьирования Ω_{12} и γ максимальное демпфирование колебаний, и соответственно снизить

динамические нагрузки на механическую часть.

Возможность такого выбора параметров обеспечим при условии $T_3 = 0$. В данном случае характеристическое уравнение упрощается:

$$\frac{\gamma T_{M1}}{\Omega_{12}^2} p^3 + \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 + \gamma T_{M1} p + 1 = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) должно быть нормировано, а анализ его может быть выполнен по диаграмме Вышнеградского [2] (рис. 5 – выбор параметров электропривода с упругой связью).

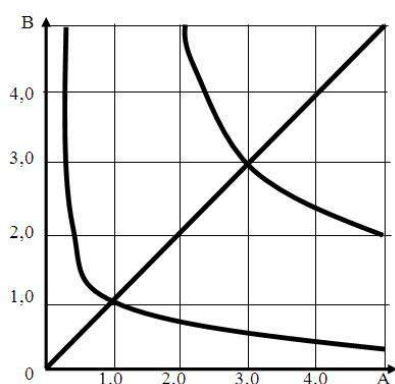


Рис. 5

Коэффициенты Вышнеградского записываются в виде:

$$A = 3\sqrt{\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2 T_{M1}}}, \quad B = 3\sqrt{\gamma^2 \Omega_{12}^2 T_{M1}}.$$

Условие устойчивости $AB > 1$ приводит к $AB = \gamma > 1$. Оптимальным процессам соответствует $A = B$, уход с этой прямой в любую сторону ухудшает переходный процесс. Начиная с точки $A = B = 3$ ($\gamma = 9$) в системе возможны апериодические переходные процессы. Зависимость предельного демпфирования $\lambda = 2\pi\alpha/\Omega$ [где α – действительная, а Ω – мнимая части корней характеристического уравнения (6)] в системе от момента инерции нагрузки приведена на рис. 6 – оценка демпфирующих свойств электропривода.

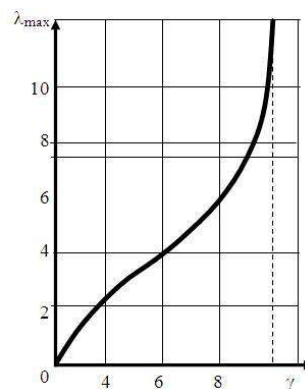


Рис. 6

Эта зависимость показывает, что при малых соотношениях инерционных масс получить в системе удовлетворительное демпфирование сложно. Приемлемое демпфирование возможно при введении дополнительных корректирующих обратных связей. Например, введение обратной связи по производной от скорости исполнительного механизма эквивалентно увеличению коэффициента соотношения инерционных масс, а введение обратной связи по производной от скорости двигателя, наоборот – уменьшению коэффициента соотношения инерционных масс.

Поскольку в наматывающих устройствах момент инерции нагрузки J_2 не остается постоянным, а изменяется в процессе наматывания полотна, то и демпфирующая способность электропривода при постоянной настройке будет меняться.

Для обеспечения инвариантности динамических свойств электропривода к изменению момента инерции целесообразно применение адаптивного управления. В частности, при параметрической адаптации регулятор скорости в системе подчиненного регулирования компенсирует механическую постоянную времени T_{M1} . Для обеспечения инвариантности динамических свойств в данном случае целесообразно проводить перенастройку регулятора скорости пропорционально изменению момента инерции.

Информацию о текущем значении момента инерции можно получить либо расчетным путем, либо с помощью адаптивного наблюдателя. Кроме того, целесооб-

разно использование технологии нейронных сетей.

Для ограничения динамических нагрузок при пуске и обеспечения устойчивости вышеописанной системы применим нейроконтроллер (НК) на базе прямонаправленной искусственной нейронной сети типа персептрон структуры 5-10-1 [3]. При этом используем сигналы обратных связей по скорости первой и второй масс с двумя элементами задержки в каждой.

Структурная схема двухмассовой ЭМС с зазором и нейроконтроллером представлена на рис. 7.

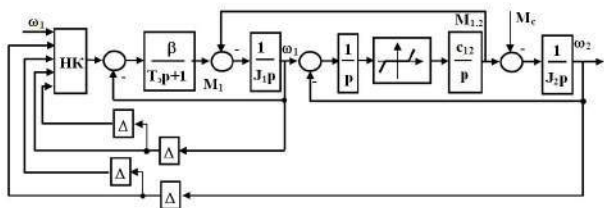


Рис. 7

При постановке задачи выход нейроконтроллера – неизвестная величина, поэтому для его синтеза наиболее подходит

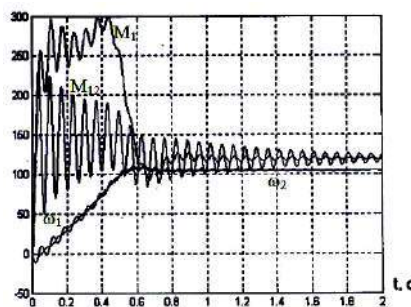


Рис. 8

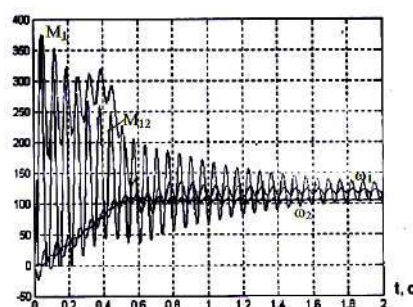


Рис. 9

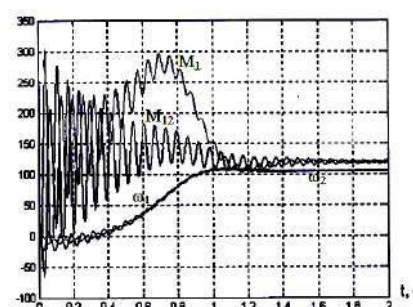


Рис. 10

Проверим работу синтезированного нейроконтроллера на двухмассовой ЭМС с зазором. Пуск такой системы представлен на рис. 9. По данным зависимостям видно, что полученный нейроконтроллер не справляется с поставленной задачей, поэтому синтезируем его повторно с учетом зазора в кинематической связи системы. Переходные процессы в такой системе представлены на рис. 10 (переходный процесс в двухмассовой ЭМС с $\Delta\varphi = 0,4$ рад и НК). Видно, что вновь полученный нейроконтроллер обеспечил устойчивость си-

методика генетических алгоритмов [4], при помощи которой происходит минимизация следующего критерия $F(1)$:

$$F = \frac{1}{t_{п.п}} \int_0^{t_{п.п}} \left(E_1 t + \frac{E_2}{t + \varepsilon} + \frac{E_3}{t + \varepsilon} \right) dt,$$

где $t_{п.п}$ – время переходного процесса; ε – бесконечно малая величина; $E_1 = [(\omega_2 - \omega_1)t]^2$ – ошибка по скорости второй массы ω_2 ; $E_2 = (|M_1| - M_{доп})^2$ – ошибка по моменту электродвигателя M_1 , рассчитываемая при превышении допустимого момента $M_{доп}$; $E_3 = (|M_{1,2}| - M_{доп})^2$ – ошибка по упругому моменту $M_{1,2}$, рассчитываемая при превышении допустимого момента $M_{доп}$.

В процессе работы электропривода зазор в кинематических передачах изменяется. Поэтому используем нейроконтроллер, который обеспечивает устойчивую работу и ограничение динамических нагрузок системы без зазора и с зазором. Переходные процессы в двухмассовой ЭМС с зазором и нейроконтроллером представлены на рис. 8.

стемы и ограничил динамические нагрузки в ней.

ВЫВОДЫ

1. Нейроконтроллер, синтезированный для системы без зазора, не может быть применен для системы с зазором.
2. Нейроконтроллер, синтезированный для ЭМС с зазором, обеспечивает устойчивость и ограничение динамических нагрузок при пуске.

3. Нейроконтроллер, синтезированный для ЭМС с одним значением зазора, устойчиво работает при изменении зазора от нуля до требуемого значения.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Поляков К.А., Поляков А.Е. Методы и системы энергосберегающего управления текстильным оборудованием: Монография. – М.: МГТУ им. А.Н.Косыгина, 2004.

2. Электрические системы. – Т.1. Математические задачи электроэнергетики. / Под. ред. В.А.Веникова. – М.:Высшая школа, 1970.

3. Комарцева Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры. – М.: МГТУ им.Баумана, 2004.

4. Вороновский Г.К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Гос. спец. изд-во "Основа". – Харьков, 1997.

Рекомендована кафедрой электротехники. Поступила 03.06.11.
