

Е.С. Ребенков

## СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ЧАСТОТНО- УПРАВЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОНВЕЙЕРА С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ

Получена в векторно-матричной форме передаточная функция электромеханической системы частотно-управляемого двухдвигательного электропривода конвейерной линии. Разработана математическая модель частотно-управляемого электропривода, учитывающая распределенную нагрузку на конвейерной линии. Показано возникновение в механической части конвейера колебательных явлений, обусловленных наличием упругости рабочей части конвейера. Получены переходные процессы в электроприводе при управляющих и возмущающих воздействиях на электропривод, выполненный по схеме «частотно-управляемый асинхронный двигатель – преобразователь частоты». Синтезирован нечеткий регулятор скорости перемещения конвейера, демпфирующий колебания скоростей масс и деформаций в упругих связях. Получены переходные процессы координат привода с нечетким регулятором. Проведено сравнение переходных процессов в электроприводе конвейера с нечетким регулятором и без него. Показана эффективность демпфирования упругих колебаний скоростей элементарных масс конвейера и деформаций его упругих связей.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, многомассовая модель привода конвейера, упругие связи, демпфирование колебаний, фиксатор нулевого порядка, функции принадлежности, универсальное множество, база правил, лингвистические оценки.

**К**инематическая схема привода конвейера представлена в виде замкнутой последовательности сосредоточенных масс, соединенных упругими связями [1]. Перемещение конвейерной линии производится частотно-регулируемыми асинхронными двигателями (АД) на концевых барабанах. При управляющих воздействиях  $u_1$  и  $u_2$  на преобразователях частоты (ПЧ) в механической части привода возникают динамические колебания скоростей  $\omega_i$  элементарных масс и деформаций  $\delta_{ij}$  упругих

связей, снижающие ресурс и надежность электропривода конвейера [2], [3].

Математическая модель механической части привода конвейера представлена в виде уравнения передаточной функции (ПФ) в векторно-матричной форме [4], [5]:

$$\overline{W}(s) = \overline{M}(s) \cdot \frac{\overline{R}_{ij}(s)}{\overline{X}(s)}, \quad (1)$$

где

$\overline{W}(s) = [\omega_1(s), \omega_2(s), \dots, \omega_n(s)]^T$  – вектор приведенных скоростей элементарных масс;

$\overline{M}(s) = [M_1(s), M_2(s), \dots, M_n(s)]^T$  – вектор моментов сил и моментов сопротивлений на массах;

$\overline{R}_{ij}(s), \overline{X}(s)$  – матрицы ПФ  $n$ -го порядка, где  $n$  – количество элементарных масс.

Матрицы ПФ конвейера имеют вид:

$$\overline{X}(s) = \begin{pmatrix} m_{11} & a_{12} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{n1} \\ a_{21} & m_{22} & a_{23} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{k,k-1} & m_{kk} & a_{k,k+1} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & m_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ a_{1n} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n,n-1} & m_{nn} \end{pmatrix},$$

$$\overline{R}_{ij}(s) = \begin{pmatrix} m_{11} & a_{12} & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & a_{n1} \\ a_{21} & m_{22} & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & s & \dots & a_{k,k-1} & m_{kk} & a_{k,k+1} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & m_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ a_{1n} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n,n-1} & m_{nn} \end{pmatrix}.$$

Элементы матриц определяются параметрами механической части конвейера:

$$a_{ij} = -(c_{ij} + b_{ij}s), \quad m_{kk} = J_k s^2 - \sum_{i,j=1}^{i,j=k} a_{ij}, \quad (2)$$

где  $c_{ij}$  – жесткость упругих связей, Нм;  $b_{ij}$  – вязкость упругих связей, Нс/м;  $J_k$  – приведенный момент инерции элементарной сосредоточенной массы, кг·м<sup>2</sup>.

Двухдвигательный регулируемый электропривод конвейера выполнен по схеме «асинхронный двигатель – преобразователь частоты» (АД – ПЧ), в которой напряжение управления ПЧ  $u_y$ , скорости ротора АД  $\omega_{1(k)}$  с учетом редуктора и вращающие моменты  $M_{1(k)}$  двигателей связаны ПФ вида [6]:

$$u_y(s) \cdot U(s) = \omega_{1(k)}(s) \cdot F(s) + M_{1(k)}(s) \cdot N(s). \quad (3)$$

В операторных соотношениях ПФ (3) заданы параметры системы АД – ПЧ:

$$U(s) = \beta_d k_{II}, \quad F(s) = \beta_d (T_1 s + 1), \quad N(s) = (T_1 s + 1)(T_2 s + 1),$$

где  $\beta_d$  – динамическая жесткость механической характеристики АД, Нмс;  $k_{II}$  – коэффициент усиления по каналу напряжения и частоты ПЧ, 1/Вс;  $T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени соответственно АД и ПЧ, с.

При  $k = 5$  и  $n = 8$  совместное решение ПФ механической части (1) и электропривода АД – ПЧ (3) дает ПФ скоростей масс в зависимости от сигнала управления ПЧ:

$$\omega_i(s) = u_y(s) \frac{\theta_i(s)}{\Psi(s)}, \quad (4)$$

где полиномы ПФ (4) выражены через параметры системы:

$$\Psi(s) = N(s) \cdot X(s) [F(s) \cdot R_{11}(s) + F(s) \cdot R_{55}(s) + N(s) \cdot X(s)] + F^2(s) [R_{11}(s) \cdot R_{55}(s) - R_{15}(s) \cdot R_{51}(s)]. \quad (5)$$

$$\theta_i(s) = U(s) \left\{ \begin{array}{l} F(s) \left[ \begin{array}{l} R_{51}(s) \cdot R_{i5}(s) + R_{i1}(s) \cdot R_{15}(s) - \\ - R_{55}(s) \cdot R_{i1}(s) - R_{i5}(s) \cdot R_{11}(s) \end{array} \right] - \\ - N(s) \cdot X(s) [R_{i1}(s) + R_{i5}(s)] \end{array} \right\}. \quad (6)$$

ПФ деформаций упругой связи между  $i$ -ым и  $j$ -тым элементарными массами определяется как интеграл от разности их скоростей:

$$\delta_{ij}(s) = u_y(s) \cdot \frac{\omega_i(s) - \omega_j(s)}{s \cdot \Psi(s)}. \quad (7)$$

Исследования на модели показали, что максимальные значения динамических колебаний скоростей элементарных масс и деформаций упругих связей возникают в местах соединений

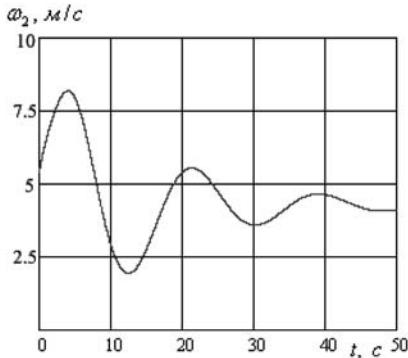


Рис. 1. Переходная функция скорости массы  $J_2$

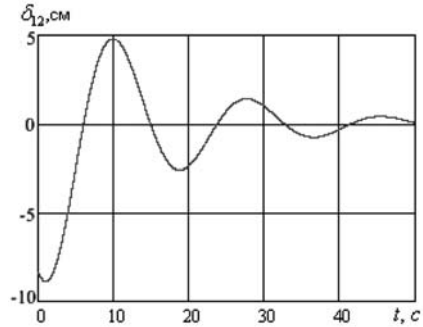


Рис. 2. Переходная функция деформации  $\delta_{12}$

с приводными барабанами, поэтому обратные связи в регулятор введены по скоростям  $\omega_2$  и  $\omega_{k-1}$ . Переходные функции скорости (рис. 1) и деформации (рис. 2) на грузовых участках конвейера, примыкающих к приводным барабанам построены по рассчитанным ПФ для параметров механической части конвейера и электропривода:

$$J_1 = J_5 = 1,163 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, J_2 = J_3 = J_4 = 0,567 \text{ кг}\cdot\text{м}^2, \\ J_6 = J_7 = J_8 = 0,113 \text{ кг}\cdot\text{м}^2,$$

жесткости и вязкости на всех участках приняты равными соответственно

$$c_{ij} = 0,126 \text{ Нм}, b_{ij} = 0,132 \text{ Нс/м}, \beta_{\text{д}} = 63,7 \text{ Нмс}, \\ k_{\text{п}} = 15,7 \text{ 1/Вс}, T_1 = 0,02 \text{ с}, T_2 = 0,0167 \text{ с},$$

Приведенные угловые скорости элементарных масс на графиках показаны в виде линейных скоростей.

Характеристический полином электромеханической системы получен в виде:

$$\Psi(s) = 1,103 \cdot 10^{-25} + 9,26 \cdot 10^{-23} \cdot s + 9,303 \cdot 10^{-9} \cdot s^2 + 4,83 \cdot 10^{-6} \cdot s^3 + \\ + 6,57 \cdot 10^{-5} \cdot s^4 + 5,79 \cdot 10^{-4} \cdot s^5 + 3,68 \cdot 10^{-3} \cdot s^6 + 0,0186 \cdot s^7 + 0,0773 \cdot s^8 + \\ + 0,272 \cdot s^9 + 0,819 \cdot s^{10} + 2,14 \cdot s^{11} + 4,897 \cdot s^{12} + 9,84 \cdot s^{13} + \\ + 17,43 \cdot s^{14} + 27,3 \cdot s^{15} + 37,7 \cdot s^{16} + 46,1 \cdot s^{17} + 49,7 \cdot s^{18} + 47,02 \cdot s^{19} + \\ + 38,9 \cdot s^{20} + 27,9 \cdot s^{21} + 17,2 \cdot s^{22} + 8,99 \cdot s^{23} + 3,92 \cdot s^{24} + 1,39 \cdot s^{25} + \\ + 0,387 \cdot s^{26} + 0,081 \cdot s^{27} + 0,0118 \cdot s^{28} + 0,00107 \cdot s^{29} + 5,21 \cdot 10^{-5} \cdot s^{30} + \\ + 1,56 \cdot 10^{-6} \cdot s^{31} + 3,11 \cdot 10^{-8} \cdot s^{32} + 4,09 \cdot 10^{-10} \cdot s^{33} + 3,39 \cdot 10^{-12} \cdot s^{34} + \\ + 1,428 \cdot 10^{-14} \cdot s^{35}.$$

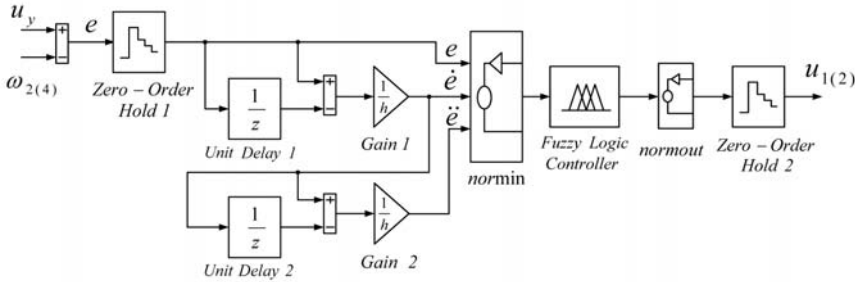


Рис. 3. Структурная схема одного канала нечеткого регулятора

При расчете регулятора использованы только доминирующие корни характеристического уравнения, рассчитанные по разработанной нами методике.

Для демпфирования колебаний деформаций упругих элементов конвейера разработан двухканальный нечеткий регулятор (НР) на основе алгоритма «минимаксного» нечеткого вывода Мамдани (Max – Min Inference). Для входных и выходных параметров НР использованы одни и те же функции принадлежности треугольного вида [7], [8]. Структурная схема НР в системе MATLAB представлена на рис. 3.

НР состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП) – фиксатора нулевого порядка Zero-Order Hold 1 с шагом квантования  $h$ , блоков оценки первой  $\dot{e}$  и второй  $\ddot{e}$  производной ошибки  $e$  системы, блоков нормирования входных (normin) и выходных (normout) сигналов, центрального блока НР Fuzzy Logic Controller и выходного цифроаналогового преобразователя – фиксатора Zero-Order Hold 2. Функции принадлежности (ФП) (membership functions) и база правил (rules) задаются в центральном блоке НР [9], [10].

Диапазоны изменения входных параметров НР  $e$ ,  $\dot{e}$ ,  $\ddot{e}$  и выходных параметров  $u_{1(2)}$  отображены на единое универсальное множество  $M = [0, 1]$ , на котором задаются три нечетких подмножества, функции принадлежности которых имеют треугольную форму. Для каждой лингвистической величины получены аналитические выражения вида [11]:

$$\begin{aligned} \mu_1(x) &= 1 - x, \quad x \in [0, 1]; \\ \mu_2(x) &= x, \quad x \in [0, 1]; \\ \mu_3(x) &= \begin{cases} 2x, & x \in [0, 0,5] \\ 2(1 - x), & x \in [0,5, 1] \end{cases} \end{aligned}$$

Расчет четких величин  $x_1^*$ ,  $x_2^*$ ,  $x_3^*$  определяется по формулам:

$$\begin{aligned}x_1^* &= (e^* - e_{\min}) / (e_{\max} - e_{\min}); \\x_2^* &= (\dot{e}^* - \dot{e}_{\min}) / (\dot{e}_{\max} - \dot{e}_{\min}); \\x_3^* &= (\ddot{e}^* - \ddot{e}_{\min}) / (\ddot{e}_{\max} - \ddot{e}_{\min});\end{aligned}$$

Лингвистическое правило управления НР имеет вид:

$$\begin{aligned}\text{Если } (e^* = a_1^j) \text{ и } (\dot{e}^* = a_2^j) \text{ и } (\ddot{e}^* = a_3^j), \\ \text{то } (u_{1(2)}^* = a_c^j), \quad j = \overline{1,3},\end{aligned}\tag{8}$$

где  $a_1^j$ ,  $a_2^j$ ,  $a_3^j$  – лингвистические оценки входных параметров, а  $a_c^j$  – лингвистические оценки управляющих воздействий на объект. Таким образом, все лингвистические переменные разделены на отрицательные ( $j = 1$ ), положительные ( $j = 2$ ) или близкие к нулю ( $j = 3$ ) [12].

Для определения конкретного значения управляющего воздействия формируется «результатирующая фигура», ограниченная результирующей ФП. Производится поиск абсциссы  $x_c$  «центра тяжести» результирующей фигуры и полученное значение по формуле

$$u_{1(2)}^* = u_{\min} + (u_{\max} - m_{\min}) \cdot x_c\tag{9}$$

преобразуется в четкое значение управляющего воздействия на объект управления [13].

По результатам математического моделирования в системе MATLAB с использованием пакета нечеткой логики (Fuzzy Logic Toolbox) получены переходные функции частотного привода конвейера с НР – скорости  $\omega_1$  и  $\omega_2$  (рис. 4).

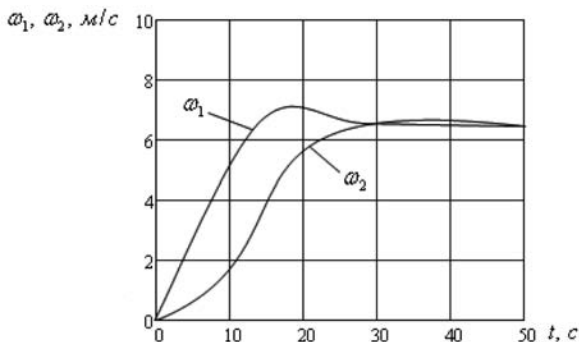


Рис. 4. Переходные функции скоростей  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  конвейера с НР

Сравнение с соответствующими переходными функциями в электроприводе конвейера без регулятора показывает практически полное демпфирование колебаний скоростей элементарных масс конвейера и снижение деформаций упругого звена до 70% от значений деформаций в приводе конвейера без НР.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ребенков Е. С.* Оптимальное управление электроприводом ленточного конвейера / Математические методы в технике и технологиях: сборник трудов XXI Международной научной конференции. Т. 6. – Саратов: СГТУ, 2008. – С. 27–29.
2. *Ребенков Е. С.* Демпфирование колебаний в приводе ленточного конвейера // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 8. – С. 183–188.
3. *Поляков А. Е., Чесноков А. В., Филлимонов Е. М.* Электрические машины, электропривод и системы интеллектуального управления электромеханическими комплексами. – М.: Форум: Инфра-М, 2015. – 224 с.
4. *Ребенков Е. С.* Цифровой регулятор демпфирования упругих колебаний в многомассовом электроприводе // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 2. – С. 330–335.
5. *Чикуров Н. Г.* Моделирование систем и процессов. – М.: РИОР: Инфра-М, 2013. – 398 с.
6. *Шимарев В. Ю.* Теория автоматического управления. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 352 с.
7. *Коньшьева Л. К., Назаров Д. М.* Основы теории нечетких множеств. – СПб.: Питер, 2011. – 192 с.
8. *Mamdani E. H.* Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // IEEE Transactions on Computers. 1977. Vol. 26, no. 12. pp. 1182 – 1191.
9. *Емельянов С. Г., Титов В. С., Бобырь М. В.* Автоматизированные нечетко-логические системы управления. – М.: Научная мысль. Инфра-М, 2012. – 176 с.
10. *Ross T. J.* Fuzzy logic with engineering applications. McGraw-Hill: 1995. 600 p.
11. *Zadeh L. A.* Fuzzy logic // IEEE Transactions on Computers. 1988, Vol. 21, no. 4. pp. 83–93.
12. *Takai T., Sugeno M.* Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1985, Vol. 15, no. 1, pp. 116–132.
13. *Пегат А.* Нечеткое моделирование и управление; пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 798 с. **VIAB**

#### КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

*Ребенков Евгений Степанович* – кандидат технических наук, доцент, e-mail: diolallin@mail.ru, Новомосковский институт (филиал) Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева. 301650, Новомосковск.

**E.S. Rebenkov**

**THE INDISTINCT REGULATOR  
OF THE FREQUENCY OPERATED ELECTRIC DRIVE  
OF THE CONVEYOR WITH ELASTIC TIES**

Transfer function of electromechanical system of the frequency operated two-engine electric drive of the conveyor line is developed in a vector-matrix form. The indistinct regulator of speed of movement of the conveyor, damping fluctuations of speeds of masses and deformations in elastic communications is synthesized. Transients of coordinates of the drive with the indistinct regulator are given.

Key words: indistinct regulator, multimass model of the drive of the conveyor, elastic ties, damping of fluctuations.

**AUTHOR**

*Rebenkov E.S.*, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
e-mail: diolallin@mail.ru,  
Novomoskovsk Institute (branch) of D. Mendeleev University  
of Chemical Technology of Russia, 301650, Novomoskovsk, Russia.

**REFERENCES**

1. Rebenkov E. S. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sbornik trudov XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. T. 6. (Mathematical methods in techniques and technologies: 21st International Conference Proceedings, vol. 6), Saratov, SGTU, 2008, pp. 27–29.
2. Rebenkov E. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, no 8, pp. 183–188.
3. Polyakov A. E., Chesnokov A. V., Filimonov E. M. *Elektricheskie mashiny, elektropriivod i sistemy intellektual'nogo upravleniya elektromekhanicheskimi kompleksami* (Electrical machines, electrical drives and intellectual control of electromechanical assemblies), Moscow, Forum: Infra-M, 2015, 224 p.
4. Rebenkov E. S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 2, pp. 330–335.
5. Chikurov N. G. *Modelirovanie sistem i protsessov* (Modeling systems and processes), Moscow, RIOR: Infra-M, 2013, 398 p.
6. Shishmarev V. Yu. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* (Theory of automated control), Moscow, Izdatel'skiy tsentr «Akademiya», 2012, 352 p.
7. Konysheva L. K., Nazarov D. M. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* (Elements of theory of fuzzy sets), Saint-Petersburg, Piter, 2011, 192 p.
8. Mamdani E. H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis // *IEEE Transactions on Computers*. 1977. Vol. 26, no. 12. pp. 1182–1191.
9. Emel'yanov S. G., Titov V. S., Bobyr' M. V. *Avtomatizirovannyye nechetko-logicheskie sistemy upravleniya* (Automated fuzzy-logic control systems), Moscow, Nauchnaya mysl'. Infra-M, 2012, 176 p.
10. Ross T. J. *Fuzzy logic with engineering applications*. McGraw-Hill: 1995. 600 p.
11. Zadeh L. A. Fuzzy logic. *IEEE Transactions on Computers*. 1988, Vol. 21, no. 4. pp. 83–93.
12. Takai T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. 1985, Vol. 15, no. 1, pp. 116–132.
13. Pegat A. *Nechetkoe modelirovanie i upravlenie*; per. s angl. (Fuzzy modeling and control. English–Russian translation), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2009, 798 p.