

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

AUTOMATIC CONTROL
AND IDENTIFICATION

УДК 62-523.8: 004.896

Исследование наблюдателей состояния для применения в управлении электроприводами*

Л.Е. КОЗЛОВА¹, Л.А. ПАЮК²

¹ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Томский политехнический университет, ассистент. E-mail: kozlova@tpu.ru

² 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, 30, Томский политехнический университет, ассистент. E-mail: lubara81@mail.ru

Важным аспектом при управлении сложными динамическими объектами, предназначенными для работы в тяжелых эксплуатационных условиях, таких как агрессивная, взрывоопасная и запыленная среды, экстремальные температуры, повышенная вибрация [1], является применение в них реальных датчиков. Использование наблюдателей состояния в таких объектах позволит повысить эксплуатационную надежность электропривода, избежать ударных токов [2, 3], уменьшить массогабаритные характеристики и др. В последнее время предъявляются высокие требования к современным системам управления электроприводов, а именно: точное управление скоростью, поддержание высокого момента на низких скоростях управления, ограничение пусковых и ударных токов, высокие динамические характеристики, высокая точность обработки сигнала, улучшение координатной точности [4]. На сегодняшний день известны различные методы идентификации параметров и переменных состояния асинхронного электропривода, к числу которых можно отнести расширенный фильтр Калмана; наблюдатель, созданный на основе нейронной сети и с помощью нечеткой логики; генетические алгоритмы. Большинство известных наблюдателей не обеспечивают поддержание необходимой точности идентификации параметров и переменных состояния во всем диапазоне регулирования скоростей при различных режимах работы электропривода и несинусоидальности форм статорных токов. Последнее замечание характерно при управлении асинхронным двигателем от тиристорного регулятора напряжения или автономного инвертора напряжения [5]. Целью исследования, представленного в статье, является сравнительный анализ наиболее часто встречающихся на практике наблюдателей состояния асинхронного электропривода по простоте их реализации (с точки зрения математического описания) и робастности. На основе данного анализа выработаны практические рекомендации по их применению в данном виде электропривода с точки зрения их эффективности.

Ключевые слова: нейронная сеть, расширенный фильтр Калмана, нечеткая логика, генетический алгоритм, асинхронный двигатель, асинхронный электропривод

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-7-16

* Статья получена 16 сентября 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день использование реальных датчиков в сложных динамических системах, а в частности, для электроприводов, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, нежелательно по ряду причин, к числу которых можно отнести значительное удорожание установки, увеличение массогабаритных характеристик, снижение эксплуатационной надежности и др. Способами идентификации параметров и переменных состояния занимаются как отечественные, так и зарубежные коллективы ученых [6–8]. Для идентификации параметров и переменных состояния используются наблюдатели на основе расширенного фильтра Калмана, нечеткой логики, нейронных сетей и генетических алгоритмов.

1. РАСШИРЕННЫЙ ФИЛЬТР КАЛМАНА

Для решения задач идентификации в современных системах управления используют также расширенный фильтр Калмана (РФК). Его используют для идентификации не только параметров, но и переменных состояния объекта в режиме реального времени.

Фильтр Калмана (ФК) является рекурсивным линейным алгоритмом и используется для идентификации параметров и переменных состояния динамического объекта при воздействии случайных шумов [9]. В таком случае ФК может быть использован только для линейных и линеаризованных объектов, а помехи – относиться к классу белого гауссовского шума [10]. При использовании идентификатора на основе ФК необходимо знать ряд исходных данных: начальные условия о векторе состояния и значений ошибок, подробную информацию о системе измерения и наиболее вариантном характере помех [10].

Блок-схема системы управления асинхронным электроприводом с наблюдателем состояния представлена на рис. 1.

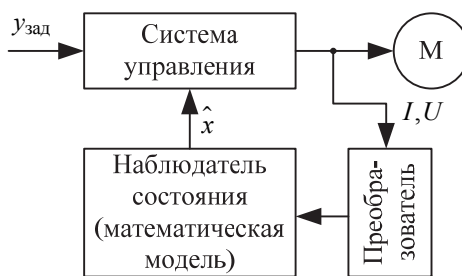


Рис. 1. Блок-схема системы управления асинхронным электроприводом с наблюдателем состояния

Сигналы системы управления асинхронного электропривода с наблюдателем состояния формируются следующим образом.

1. Сигнал задания $u_{\text{зад}}$ подается на систему управления асинхронным электродвигателем.

2. Данные с датчиков статорных токов и напряжений поступают на блок преобразования, а уже преобразованные передаются на наблюдатель состояния, реализованный на основе математической модели.

3. Оцененный сигнал поступает на блок системы управления, корректируя его работу.

В работе [10] система уравнений, позволяющая создать ФК для оценки параметров и переменных состояния асинхронного двигателя (АД), описанного в неподвижной системе координат, имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A \cdot x + B \cdot u_{ab} + K \cdot (i_{ab} - C \cdot x); \\ y &= C \cdot x;\end{aligned}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha_1 - k_1 k_2 \frac{\alpha}{\sigma} & k_2 K \alpha & 0 & k_2 K \varpi \\ \alpha L_{12} & -\alpha & 0 & -\varpi \\ 0 & -k_2 K \varpi & -\alpha_1 - k_1 k_2 \frac{\alpha}{\sigma} & k_2 K \alpha \\ 0 & \varpi & \alpha L_{12} & -\alpha \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

где $\alpha = R_2/L_2$; $\alpha_1 = R_1/\sigma L_1$; $K = 1/\sigma L_1$; $\beta = k_2 K$; i_a, i_b – ток статора; Ψ_a, Ψ_b – потокосцепление ротора; $\varpi = n_p \omega$, n_p – число пар полюсов; ω – угловая скорость вращения вала ротора; u_{ab} – вектор сигнала управления; i_{ab} – вектор токов статора, полученных от датчиков тока после фазового преобразования.

Переменные x, y относятся к ФК, а $u_{ab} = (u_a, u_b)$, $i_{ab} = (i_a, i_b)$ – к объекту управления электроприводом. Матрица K определяет коэффициенты усиления, зависящие от критерия качества ФК.

В том случае, если необходимо одновременно оценивать переменные и параметры состояния сложного динамического объекта, ФК расширяют, добавляя к вектору x дополнительный вектор Θ . Таким образом, уравнения, описанные ранее, становятся нелинейными и принимают следующий вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}_e &= A \cdot x_e + B \cdot u_{ab} + K(i_{ab} - C \cdot x); \\ y &= C \cdot x_e; \\ x_e &= [x \quad \Theta].\end{aligned}$$

2. НЕЧЕТКАЯ ЛОГИКА

Основы нечеткой логики (Fuzzy logic) были заложены в начале 60-х годов XX века в работах американского математика Лафти Заде. В нечеткой логике (НЛ), в отличие от классической, вместо понятий «истина» и «ложь» используется величина «степень истинности», принимающая любые значения из бесконечного множества от нуля до единицы включительно [11]. Следовательно, логические операции (конъюнкции, дизъюнкции и отрицания) уже можно представить логически (таблично). В нечеткой логике они задаются функциями.

Два способа реализации дизъюнкции и конъюнкции:

максимальный подход

$$a||b \Rightarrow \max(a,b);$$

$$a\&b \Rightarrow \min(a,b).$$

колометрический подход

$$a||b \Rightarrow a+b \Rightarrow a*b;$$

$$a\&b \Rightarrow a*b.$$

Отрицание задается как: $\neg a \Rightarrow 1 - a$.

Для крайних случаев, когда значения 1 или 0 – приведенные выше функции, дают таблицы истинности операций классической логики.

Особенностью нечеткой логики является также наличие процесса дефазификации, который отражает преобразование нечеткого множества в четкое число. Для многоэкстремальных функций принадлежности применяются следующие методы дефазификации [12]:

- центр тяжести;
- центр максимумов;
- первый максимум.

Аппарат нечеткой логики применяется от систем управления летательных аппаратов до подведения итогов на выборах.

Контроллеры нечеткой логики – наиболее важное техническое приложение нечеткой логики. Для описания системы используются знания экспертов, а не дифференциальные уравнения.

3. ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

История эволюционных вычислений берет свое начало с 60-х годов XX века с классификационных систем Холланда. Далее Расстригиным Л.А. в 70-х годах XX века был предложен алгоритм, в основу которого было положено бионическое поведение особей. Дальнейшее развитие этих идей было отражено в работах Бутаковой И.П. по эволюционному моделированию. Неймарк Ю.И. предложил осуществлять поиск глобального экстремума на основе коллектива независимых автоматов, моделирующих процессы развития и элиминации особей. Большой вклад в развитие эволюционного программирования внесли Фогел и Уолш [13].

Представим несколько определений понятия «генетический алгоритм» (ГА).

1. Генетические алгоритмы – адаптивные методы поиска, которые на сегодняшний день активно используются для решения задач функциональной оптимизации.

2. Генетический алгоритм по своей сути не что иное, как приближенное моделирование процесса эволюции.

3. Генетические алгоритмы – стохастические, эвристические, оптимизационные методы решения сложных задач. (Холланд, 1975.)

Каждое из этих определений отражает суть процесса, а именно моделирование технических систем на основе природных процессов изменения внутри системы и ее окружения.

Методов построения ГА, которые применяются для построения нейронных сетей, несколько [13]:

- турнирный отбор – реализует n турниров, чтобы выбрать n особей. Каждый турнир построен на выборке k элементов из популяции и выборе лучшей особи среди них (Brindle, 1981; Goldberg и Deb, 1991);

- элитный метод отбора – гарантирует, что при отборе обязательно будет выживать лучшая особь популяции совокупности. Элитизм может быть внедрен почти в любой стандартный метод отбора (De Jong, 1975);

- двухточечный кроссовер – выбирают две точки разрыва, и родительские хромосомы обмениваются сегментом, который находится между двумя этими точками (Cavicchio, 1970; Goldberg, 1989);

- равномерный кроссовер – каждый бит первого родителя наследуется первым потомком с заданной вероятностью; в противном случае этот бит передается второму потомку, и наоборот (Syswerola, 1989).

Как и любой метод, данный способ нахождения решения сложных систем имеет свои плюсы и минусы. К положительным сторонам, несомненно, можно отнести «обучаемость» (эволюция в процессе работы), решение сложных задач, а к отрицательным – отсутствие гарантии обнаружения решения за полиномиальное время, наличие нескольких экстремумов в области поиска решения, что приводит к неадекватному решению.

4. НЕЙРОННАЯ СЕТЬ

Одним из современных направлений в идентификации является использование искусственных нейронных сетей (ИНС), созданных на основе компьютерной модели [14].

ИНС состоит из соединенных в определенном порядке искусственных нейронов. Каждый нейрон описывается уравнением

$$S = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i + b;$$
$$Y = f(S).$$

Здесь x_i – массив входных данных; w_i – весовой коэффициент; b – сдвиг. Выходная функция нейрона Y , называемая активационной, в большинстве случаев имеет нелинейный характер, а в некоторых – линейный.

ИНС, используемая для идентификации параметров и переменных состояния сложных динамических объектов, состоит из трех основных слоев: входного, скрытого и выходного. Скрытых слоев может быть больше одного.

На сегодняшний день к наиболее часто используемым активационным функциям нейрона относятся [15] пороговая, линейная, сигмоидальная, тангенциальная, радиально-базисная активационные функции. На практике в качестве активационной функции нейронов выходного слоя используется линейная функция. Первый слой нейронной сети является ретранслятором.

Функция активации нейронов скрытого слоя в основном имеет нелинейный характер. Согласно работе [15], наиболее подходящей функцией активации для нейронов скрытого слоя является тангенциальная функция активации.

Для идентификации параметров и переменных состояния сложных динамических объектов необходимо использовать динамические нейронные сети, к которым относятся динамическая нейронная сеть с задержкой по входу [16], сети Джордана [17], сети Элмана [18], комбинированные динамические нейронные сети [19, 20]. Особенностью данных нейронных сетей является наличие задержек сигналов по входу, по выходу и как по входу, так и по выходу, что позволяет обеспечить наилучшую обучаемость и отфильтровать сильные импульсные помехи.

Перед обучением нейронной сети разработчик должен определиться с массивом данных, необходимых для его обучения, и с выбором алгоритма обучения.

Чрезмерно большой массив данных каждого из входных сигналов может привести к эффекту переобучения, в результате которого в пределах обучающей выборки нейронная сеть дает минимальную погрешность оценивания, а при работе с проверочной выборкой (отличающейся от обучающей выборки) погрешность оценивания очень велика.

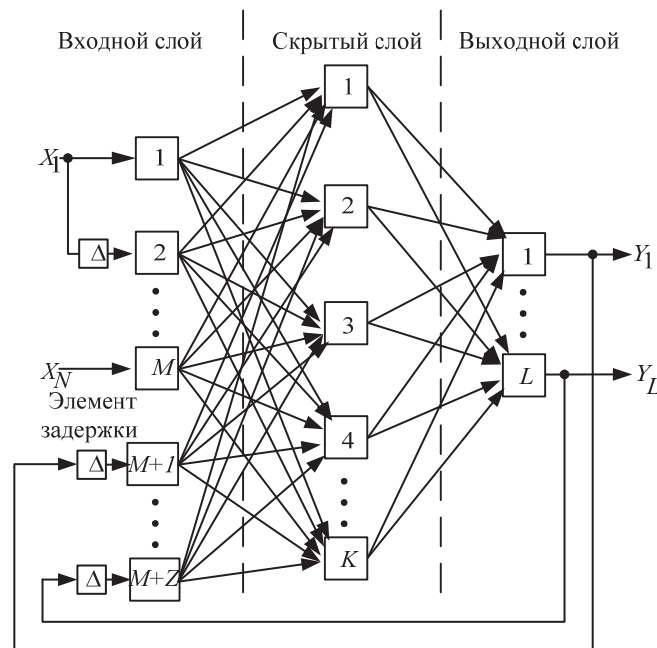


Рис. 2. Архитектура комбинированной динамической нейронной сети

На сегодняшний день существует большое количество алгоритмов обучения, основными из которых являются алгоритм градиентного спуска, алгоритм градиентного спуска с возмущением, алгоритм обучения М.Ф. Моллера и алгоритм обучения Левенберга–Марквардта. Представленные первые три метода обучения требуют небольших вычислительных мощностей компьютера, но не способны найти глобальный минимум ошибки обучения. Алгоритм обучения Левенберга–Марквардта требует значительных вычислитель-

ных способностей компьютера, но способен выйти из локального минимума и найти глобальный.

Архитектура комбинированной динамической нейронной сети представлена на рис. 2.

В таблице приведены область применения исследуемых наблюдателей состояния сложных динамических систем и критерии их результативности.

Области применения ГА и НЛ

| | | ГА | НЛ | ИНС | РФК |
|---------------------------|--|----|----|-----|-----|
| | | + | + | + | — |
| Область применения | Машинное обучение: новые архитектуры компьютеров | + | + | + | — |
| | Биологические проблемы: экологический мониторинг и прогнозирование, иммунология, популяционная генетика | + | + | + | + |
| | Социальные: экономика, политические системы | + | + | + | + |
| | Оптимизация многопараметрических функций: упрощение управления роботами, улучшение оптимизации сложных промышленных систем управления, позиционирование приводов при производстве полупроводников | + | + | + | + |
| | Системы прогнозирования землетрясений | — | + | + | — |
| | Экспертные системы | + | + | + | + |
| Критерии результативности | Робастность | + | + | + | — |
| | Необходимость знания внутренних параметров объекта идентификации | — | + | — | + |
| | Вычислительные ресурсы | + | — | +- | + |
| | Работа в режиме реального времени | — | + | + | + |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе представленных данных о наблюдателях состояния можно сделать вывод о том, что выделить какой-то определенный идентификатор не имеет смысла. Каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками. Все будет зависеть от того, в какой области будет использоваться наблюдатель и какие критерии результативности он должен поддерживать.

Робастностью обладают большинство наблюдателей состояния. Наблюдатели состояния, реализованные на основе математической модели, требуют знания внутренних параметров объекта идентификации.

Для создания наблюдателей состояния при одних и тех же вычислительных способностях компьютера наиболее трудоемкими являются наблюдатели, построенные на основе генетического алгоритма и расширенного фильтра Калмана.

Работа таких наблюдателей возможна для большинства идентификаторов, за исключением генетического алгоритма.

Область применения наблюдателей состояния довольно широка – от социальных до технических наук (вплоть до построения новых архитектур компьютеров).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В., Паюк Л.А., Воронина Н.А. Асинхронный электропривод с прерывистым движением подвижного элемента // *Электричество*. – 2009. – № 12. – С. 41–44.
2. Аристов А.В., Воронина Н.А. Рабочие характеристики электропривода колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // *Известия ТПУ*. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 64–68.
3. Аристов А.В., Паюк Л.А. Взаимосвязь ударных токов электропривода колебательного движения с геометрическими параметрами машины двойного питания при потенциальной фазовой модуляции // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2010. – № 3. – С. 54–57.
4. Аристов А.В., Паюк Л.А. Управление переходными процессами в электрических машинах периодического движения // *Известия ТПУ*. – 2009. – Т. 314, № 4. – С. 59–64.
5. Козлова Л.Е. Разработка и исследование систем замкнутого асинхронного электропривода по схеме ТРН – АД с нейросетевым наблюдателем скорости // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 5. – С. 44–49.
6. Браславский И.Я., Костылев А.В., Мезеушева Д.В. Цифровое прогнозирующее управление с использованием нейронных предсказателей // *Электротехника*. – № 11. – 2007. – С. 43–47.
7. Shue L., Chao F. Design and simulation of three-phase ac motor soft-start // *Proceedings of the 2013 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, ISDEA 2013, Hong Kong, China, 16–18 January 2013*. – Hong Kong, China, 2013. – Art. 6456458. – P. 554–557.
8. A study of fuzzy control algorithm applying to induction motor soft-starter / J. Yang, S. Shi, S. Ren, E. Cai, J. Zhou // *International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2012, Yantai, Shandong, China, 19–20 May 2012*. – Piscataway, NJ: IEEE, 2012. – Art. 6223631. – P. 347–350.
9. Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, К.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин, Л.Е. Козлова // *Известия ТПУ*. – 2010. – Т. 317, № 4. – С. 120–123.
10. Онейко О.Ф., Пташник А.И., Хильмон В.И. Тяговый электропривод с бездатчиковой системой векторного управления // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2010. – № 6. – С. 37–43.
11. Bauer P., Nouk S., Winkler R. Введение в нечеткую логику и системы нечеткого управления [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gotai.net/documents/doc-l-fl-001.aspx> (дата обращения: 18.04.2016).
12. Дефазификация [Электронный ресурс]. – URL: http://studopedia.ru/2_63172_defazzifikatsiya.html (дата обращения: 18.04.2016).
13. Исаев С. Популярно о генетических алгоритмах [Электронный ресурс]. – URL: <http://algolist.manual.ru/ai/ga/ga1.php> (дата обращения: 18.04.2016).
14. Bose B.K. *Modern power electronics and AC drive*. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001. – 710 p.
15. Козлова Л.Е. Принцип построения архитектуры нейроэмулятора угловой скорости электропривода по схеме ТРН-АД // *Научный вестник Новосибирского государственного технического университета*. – 2015. – № 1 (58). – С. 161–170.
16. Козлова Л.Е., Глазырин А.С. Нейросетевой датчик скорости асинхронного двигателя // *Тинчуринские чтения: материалы докладов V Международной молодежной научной конференции, Казань, 28–29 апреля 2010*. – Казань: КГЭУ, 2010. – С. 70–71.
17. Jordan M.I. *Serial order: a parallel distributed processing approach* / University of California, San Diego. – La Jolla, California, 1986. – 40 p. – (ICS report; 8604).
18. Elman J. Finding structure in time // *Cognitive Science*. – 1990. – Vol. 14. – P. 179–211.
19. Махотило К.В. Разработка методик эволюционного синтеза нейросетевых компонентов систем управления: дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1998. – 179 с.

20. Патент 2476983 Российская Федерация. Способ определения оценки частоты вращения асинхронного двигателя / А.С. Глазырин, Р.Ю. Ткачук, Т.А. Глазырина, В.В. Тимошкин, К.С. Афанасьев, Д.В. Гречушников, С.В. Ланграф. – № 2011135823/07; опубл. 27.02.2013, Бюл. № 6. – 21 с.

Козлова Людмила Евгеньевна, ассистент Томского политехнического университета. Основное направление исследований – искусственные нейронные сети в электроприводе. E-mail: kozlovale@tpu.ru

Паюк Любовь Анатольевна, старший преподаватель Томского политехнического университета. Основные направления исследований: колебательный электропривод, машины двойного питания как элемент энергоэффективности электромеханической системы. E-mail: lubapa81@mail.ru

*Study of state observers for electric drive control**

L.E. KOZLOVA¹, L.A. PAYUK²

¹ *National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenina Avenue, 634050, Tomsk, Russian Federation, assistant lecturer. E-mail: kozlovale@tpu.ru*

² *National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenina Avenue, 634050, Tomsk, Russian Federation, senior lecturer. E-mail: lubapa81@mail.ru*

An important aspect of the control of complex dynamic objects designed for severe operating conditions, such as aggressive, explosive and dusty environments; extreme temperatures; and increased vibration [1] is to use real sensors in them. Using an observer in such objects makes it possible to increase the operational reliability of the electric drive, to avoid shock currents [2], to reduce its weight, size and other characteristics. High requirements are now made to modern electric drive control system, namely precise speed control; maintaining a high torque at low control speeds; limiting starting and shock currents as well as high dynamic characteristics; high precision of a signal handling capability; and improved coordinate accuracy [3]. Nowadays there are various identification methods of parameters and variables of the induction motor state, including an extended Kalman filter; an observer based on a neural network, fuzzy logic, and genetic algorithms. Most famous observers do not provide the required accuracy of the identification of parameters and state variables over the entire speed control range, with various operating modes of the electric drive and non-sinusoidal stator currents. The latter is characteristic of asynchronous motor control by a thyristor voltage regulator or a self-excited voltage inverter [4]. The aim of the study presented in the paper is to make a comparative analysis of the most frequently used state observers of induction electric drives in terms of the ease of their implementation (from the standpoint of mathematical description), and robustness. Some practical recommendations for their use in this type of electric drives in terms of their effectiveness have been developed based on this analysis.

Keywords: Neural network, Kalman filter, Lyuenberger observer, fuzzy logic, genetic algorithms, asynchronous motor, electric drive

DOI: 10.17212/1814-1196-2016-1-7-16

REFERENCES

1. Aristov A.V., Payuk L.A., Voronina N.A. Asinkhronnyi elektropriwod s preryvistym dvizheniem podvizhnogo elementa [Asynchronous electric drive with intermittent movement of the movable member]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2009, no. 12, pp. 41–44. (In Russian)
2. Aristov A.V., Voronina N.A. Rabochie kharakteristiki elektropriwoda kolebatel'nogo dvizheniya v rezhime preryvistogo peremeshcheniya [The performance of the vibrational motion of the actuator in the stick-slip mode]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 64–68.
3. Aristov A.V., Payuk L.A. Vzaimosvyaz' udarnykh tokov elektropriwoda kolebatel'nogo dvizheniya s geometricheskimi parametrami mashiny dvoynogo pitaniya pri potentsial'noi fazovoi modulyatsii [Dynamics dependence of oscillating motion electric drive on geometry of double-supply

* Received 16 September 2015.

machines with voltage-phase modulation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika – Russian Electromechanics*, 2010, no. 3, pp. 54–57.

4. Aristov A.V., Payuk L.A. Upravlenie perekhodnymi protsessami v elektricheskikh mashinakh periodicheskogo dvizheniya [Transient control in electric machines periodic motion]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 59–64.

5. Kozlova L.E. Razrabotka i issledovanie sistem zamknutogo asinkhronnogo elektroprivoda po skheme TRN – AD s neirosetevym nablyudatelem skorosti [Development and research of closed systems of the asynchronous electric on scheme TVR-IM with neural network's speed observer]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 5, pp. 44–49.

6. Braslavskii I.Ya., Kostylev A.V., Mezeusheva D.V. Tsifrovoye prognoziruyushchee upravlenie s ispol'zovaniem neuronnykh predskazatelei [Digital predictive control using neural predictors]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2007, no. 11, pp. 43–47. (In Russian)

7. Shue L., Chao F. Design and simulation of three-phase ac motor soft-start. *Proceedings of the 2013 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, ISDEA 2013*, Hong Kong, China, 16–18 January 2013, art. 6456458, pp. 554–557.

8. Yang J., Shi S., Ren S., Cai E., Zhou J. A study of fuzzy control algorithm applying to induction motor soft-starter. *International Conference on Systems and Informatics, ICSAI 2012*, ICSAI 2012, Yantai, Shandong, China, 19–20 May 2012, art. 6223631, pp. 347–350.

9. Langraf S.V., Glazyrin A.S., Glazyrina T.A., Afanas'yev K.S., Timoshkin V.V., Kozlova L.E. Issledovanie parametricheskoy robnosti bezdatchikovogo vektornogo asinkhronnogo elektroprivoda s identifikatorom Kalmana [The research of parametrical robustness sensorless vector asynchronous electric drive with identifier Kalman]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 317, no 4, pp. 120–123.

10. Opeyko O.F., Ptashnik A.I., Khil'mon V.I. Tyagovyy elektroprivod s bezdatchikovoy sistemoy vektornogo upravleniya [Tractional electric drive with non-sensing element vector control system]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG – Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2010, no. 6, pp. 37–43.

11. Bauer P., Nouk S., Winkler R. *Vvedenie v nechetkuyu logiku i sistemy nechetkogo upravleniya* [Introduction to fuzzy logic and fuzzy control system]. Available at: <http://www.gotai.net/documents/doc-l-fl-001.aspx> (accessed 18.04.2016)

12. Defazzifikatsiya [Defuzzification]. Available at: http://studopedia.ru/2_63172_defazzifikatsiya.html (accessed 18.04.2016)

13. Isaev S. *Populyarno o geneticheskikh algoritmakh* [Popularly about the Genetic Algorithms]. Available at: <http://algolist.manual.ru/ai/ga/ga1.php> (accessed 18.04.2016)

14. Bose B.K. *Modern power electronics and AC drive*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2001. 710 p.

15. Kozlova L.E. Printsip postroeniya arkhitektury neyroemulyatora uglovoy skorosti elektroprivoda po skheme TRN-AD [The principle of designing an angular velocity neuroemulator architecture of the electric drive based on the TVR-IM circuit diagram]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2015, no. 1 (58), pp. 161–170.

16. Kozlova L.E., Glazyrin A.S. [Neural network sensor of speed induction motor]. *Tinchurinskie chteniya: materialy dokladov V Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii* [Tinchurin of reading: Proceedings of the V International Youth Scientific Conference], Kazan', 28–29 April 2010, pp. 70–71. (In Russian)

17. Jordan M.I. *Serial order: a parallel distributed processing approach*. Institute for Cognitive Science Report 8604. La Jolla, California, 1986. 40 p.

18. Elman J. Finding structure in time. *Cognitive Science*, 1990, vol. 14, pp. 179–211.

19. Makhotilo K.V. *Razrabotka metodik evolyutsionnogo sinteza neyrosetevykh komponentov sistem upravleniya*: diss. kand. tekhn. nauk [Development of techniques of evolutionary synthesis of neural network control systems components. PhD eng. sci. diss.]. Khar'kov, 1998. 179 p.

20. Glazyrin A.S., Tkachuk R.Yu., Glazyrina T.A., Timoshkin V.V., Afanas'yev K.S., Grechushnikov D.V., Langraf S.V. *Sposob opredeleniya otsenki chastoty vrashcheniya asinkhronnogo dvigatelya* [A method for determining evaluation induction motor speed]. Patent RF, no. 2476983, 2013.