

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЗАМКНУТОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО СХЕМЕ ТРН-АД С НЕЙРОСЕТЕВЫМ НАБЛЮДАТЕЛЕМ СКОРОСТИ

Козлова Л. Е.

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: [kozlova@tpu.ru](mailto:kozlova@tpu.ru)

В данной работе рассмотрены достоинства и недостатки тиристорного регулятора напряжения асинхронного двигателя по сравнению с преобразователем частоты. Исследован тиристорный регулятор напряжения асинхронного двигателя с замкнутым контуром скорости по сигналу с нейросетевого наблюдателя скорости. Рассмотрен принцип построения нейроэмулятора и метод его обучения. На вход нейронной сети подаются сигналы с датчиков тока, напряжения и момента, которые в достаточной мере позволяют производить оценку скорости вращения вала двигателя. Была разработана уточненная модель тиристорного регулятора напряжения, которая позволяет регулировать скорость вращения двигателя, изменяя угол открытия ключей. Адекватность работы модели устанавливается при помощи модульной и среднеквадратичной оценки качества, полученных при помощи переходных процессов АЭП с контуром скорости, замкнутого по сигналам с наблюдателя.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, тиристорный регулятор напряжения, нейросетевой наблюдатель скорости.

## RESEARCH AND DEVELOPMENT SPEED NEURAL-NETWORK OBSERVER FOR CONTROL SYSTEM OF INDUCTION MOTOR DRIVES

<sup>1</sup>Kozlova L.E.

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: [timvv@sibmail.com](mailto:timvv@sibmail.com)

This paper discusses the advantages and disadvantages of the thyristor voltage regulator induction motor is compared to the frequency converter. Studies thyristor voltage regulator induction motor with closed loop speed on a signal from the neural network observer speed. Principle of construction and method his training was reviewed. The input to the neural network signals from the sensors are fed current, voltage and torque, which estimates the rotation speed of the motor shaft. Refined model of thyristor voltage regulator was developed that allows you to adjust the speed of the motor by changing the opening angle of the keys. The adequacy of the model is established by means of modular and quadratic quality assessment, obtained by transient of asynchronous electric drive with the closed speed circuit by signals from the observer.

Keywords: asynchronous electric, a thyristor voltage regulator, neural network observer speed.

**Введение.** Немаловажными факторами при выборе способа управления объектом являются: простота управления и ценовой диапазон стоимости аппаратуры. В настоящее время в системе управления питателями сырого угля (ПСУ) используются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором (КЗ), преобразователи частоты или система плавного пуска.

Для исключения проблем с проскальзыванием, для контроля подачи топлива ПСУ необходимо поддерживать постоянность скорости вращения вала двигателя. Для этой цели подходит преобразователь частоты (ПЧ), при помощи векторного управления которого можно поддерживать жесткие механические характеристики. Но согласно исследованиям [7] стоимость ПЧ значительно превышает стоимость тиристорных регуляторов напряжения (ТРН), на основе которого будет выполнена система плавного пуска.

Так как стартовый момент зависит от загрузки конвейера и пусковые токи могут превышать номинальное значение тока двигателя в несколько раз, то использование системы мягкого пуска позволит уменьшить его величину. Для решения поставленной задачи необходимо построение замкнутой системы для системы мягкого пуска на основе идентификации скорости на основе искусственной нейронной системы (ИНС).

**Задачей** данной статьи является создание нейросетевого наблюдателя скорости и анализ его работоспособности в системе управления электропривода (ЭП) по схеме ТРН-АД, созданного по данным с датчиков тока и напряжения. Особенностью работы является проверка адекватности работы нейросетевого наблюдателя скорости в системе управления.

**Математическое описание** процессов, проходящих в асинхронном электродвигателе, имеет вид [2; 5]:

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_k \Psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r z_p) \Psi_r \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \frac{3}{2} z_p (\Psi_{sx} I_{sy} - \Psi_{sy} I_{sx}) \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = M - M_{i\dot{\alpha}\ddot{\alpha}} \end{cases},$$

где  $U_s = \begin{bmatrix} U_{sx} \\ U_{sy} \end{bmatrix}, U_r = \begin{bmatrix} U_{rx} \\ U_{ry} \end{bmatrix}, I_s = \begin{bmatrix} I_{sx} \\ I_{sy} \end{bmatrix}, I_r = \begin{bmatrix} I_{rx} \\ I_{ry} \end{bmatrix}, \Psi_s = \begin{bmatrix} \Psi_{sx} \\ \Psi_{sy} \end{bmatrix}, \Psi_r = \begin{bmatrix} \Psi_{rx} \\ \Psi_{ry} \end{bmatrix}, j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$  -

векторы напряжения, тока и потокосцепления.

Из системы уравнения видно, что скорость вращения вала двигателя зависит от многих параметров: тока, напряжения, потокосцепления, параметров электродвигателя и др. Нейронная сеть (НС) позволяет проводить оценку параметра по данным небольшого количества входных данных. Таким образом была создана нейронная сеть для оценивания скорости вращения вала АД по данным только с датчиков тока и напряжения.

**Имитационная модель системы ТРН-АД** представлена на рисунке 1. Управление системой происходит при поступлении на вход системы задания по скорости. В блоке Subsystem 1 происходит синхронизация системы управления с питающей сетью («ловится» момент перехода питающего напряжения через «0»). Далее полученный сигнал, значение угла открытия тиристора подается на блок системы импульсно-фазового управления (СИФУ), в котором рассчитывается значение времени открытия тиристорov. В блоке Subsystem 2 смоделирован блок тиристорov. Так как в схеме использовалась модель

асинхронного двигателя в двухфазной системе координат, то необходимо использовать блок Subsystem 3, для преобразования координат из трехфазной в двухфазную.

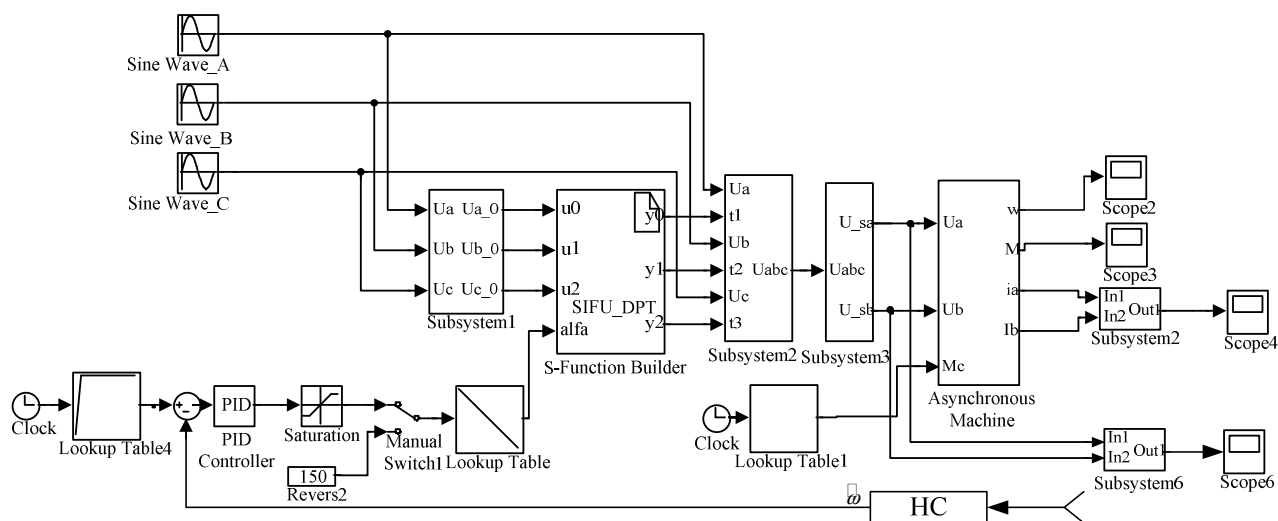


Рис. 1. Имитационная модель электропривода по схеме ТРН-АД

**Нейросетевой наблюдатель скорости.** При разработке нейросетевого наблюдателя использовалась структура сети, на входе которого имеется 13 нейронов, скрытый слой состоит из двух слоев по 43 и 111 нейронов в каждом, а выходной из – 1. В качестве функции активации скрытого слоя была выбрана логистическая функция

$$\log \text{sig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}. \quad [8]$$

Тренировочный набор для НС наблюдателя был получен на основе имитационной модели, представленной на рисунке 1. Входными параметрами являлись: среднеквадратичное значение напряжения и его задержка, среднеквадратичное значение тока и его задержка, момент двигателя и его задержки. Для тренировочного набора были представлены значения тока и напряжения, над которыми было произведено интегрирование и дифференцирование. Выходным параметром для обучения нейронного наблюдателя являлся вектор заданных значений скорости. Для уменьшения ошибки и быстроты вычислений при обучении использовался метод Левенберга-Марквардта [6]. Данный метод оптимально подходит для обучения нейронной сети, результаты получаются с небольшими затратами вычислительной мощности машины по сравнению с другими методами обучения. Тренировочный набор составлялся для различных значений скорости задания, активной и вентиляторной нагрузки.

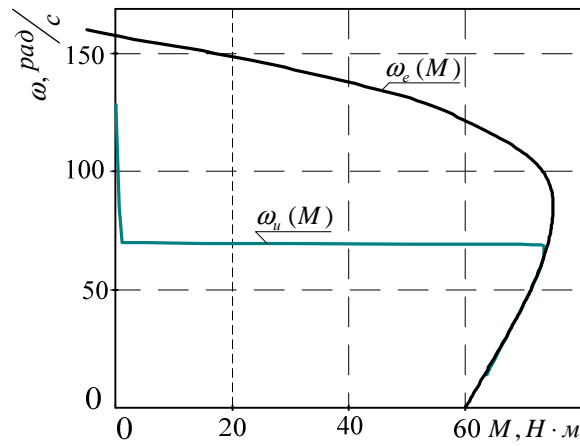


Рис. 2. Механическая естественная и искусственная характеристики

**Результаты исследования.** Обучение НС, проверка работоспособности наблюдателя скорости проводились в программной среде Matlab 7.10.0. [3], графики переходных процессов в АЭП при пуске и набросе нагрузки представлены на рис. 3.

Для оценки качества переходных процессов управления используется модульная оценка качества [1; 4]:

$$I_{\omega} = \int_0^{\infty} t |\omega_{\zeta} - \omega(t)| dt,$$

где  $\omega_{\zeta}$  - сигнал задания скорости;  $\omega(t)$  - управляемая переменная.

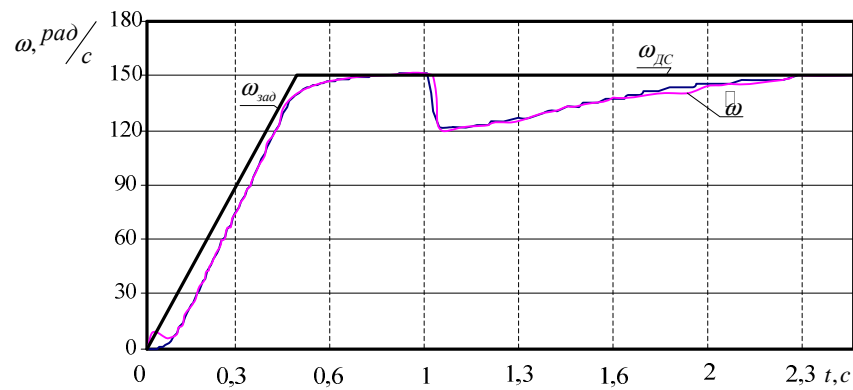
Величина динамических отклонений и его длительность оценивается интегральной оценкой. Чем меньше величина оценки, тем лучше качество процесса управления.

Помимо интегральной оценки, производилось исследование среднеквадратичной ошибки оценивания скоростей, приведенных к номинальным значениям скорости:

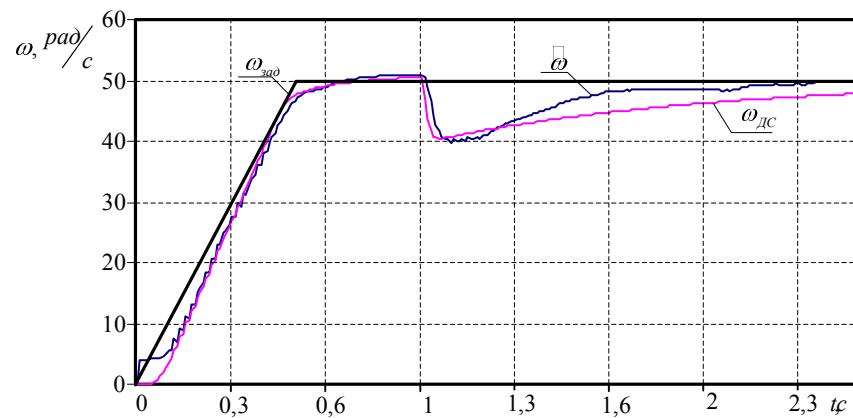
$$S_{\omega} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{\omega}_i - \omega_i)^2}{n-1}}}{\omega_H} \cdot 100 \%,$$

где  $\omega_i$  - идентифицируемый сигнал скорости на шаге интегрирования  $i$ ;  $\hat{\omega}_i$  - оценка сигнала скорости на шаге интегрирования  $i$ ;  $\omega_H$  - номинальное значение сигнала скорости.

На основании математической модели исследовались механические характеристики замкнутого электропривода, рис. 2. Из рисунка можно видеть, что при скорости задания  $\omega_{\zeta} = 70 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  модель обрабатывает заданное значение. Механическая характеристика характеризуется абсолютной жесткостью.



а)



б)

Рис. 3. Графики переходного процесса с датчиком скорости  $\omega_{АН}$  и нейросетевым наблюдателем скорости  $\omega$  по сравнению со скоростью задания  $\omega_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}$ : а)  $\omega_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = 150 \frac{\delta\ddot{a}\ddot{a}}{\ddot{n}}$ ; б)  $\omega_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}} = 50 \frac{\delta\ddot{a}\ddot{a}}{\ddot{n}}$

В таблице 1 представлены показатели качества переходных процессов АЭП с контуром скорости, замкнутого по сигналу с датчика и наблюдателя скорости, из которого видно, что статическая ошибка, модульная среднеквадратичная оценки качества при уменьшении скорости задания увеличиваются. В системе имеется провал скорости, но в случае использования нейроэмулятора скорости время восстановления скорости задания меньше.

Таблица 1 - Показатели качества переходных процессов АЭП с контуром скорости, замкнутого по сигналам с датчика и наблюдателя

		Задание на скорость $\omega_{\zeta\ddot{a}\ddot{a}}$ , рад/с	Модульная оценка качества, $I_{\omega}$ , %	Среднеквадратичная оценка качества, $S_{\omega}$ , %	Статическая ошибка, % от $\omega_f$	Провал скорости, % от $\omega_f$
Система	Датчик скорости	50	11,4	7	10	25
	Нейроэмулятор скорости	50	8,3	6,3	1,5	19

Датчик скорости	150	9,5	5	1,3	20
Нейроэмулятор скорости	150	7,4	4,4	1	15

### **Заключение**

Был разработан нейроэмулятор скорости для асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения, позволяющий идентифицировать значения скорости по данным сигналов тока, напряжения и момента.

Недостатком нейросетевого наблюдателя является то, что он не очень чувствителен к изменению параметров привода.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» 7.2826.2011 «Разработка и создание гибридной модели энергоблоков электростанций».*

### **Список литературы**

1. Бесекерский В.А., Попов. Е.П. Теория систем автоматического управления. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Профессия, 2004. — 747 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
3. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : учебное пособие. — СПб. : Корона принт, 2001. — 320 с.
4. Козлова Л.Е., Тимошкин В.В., Глазырин А.С. Разработка наблюдателя скорости для системы управления асинхронного электропривода с тиристорным регулятором напряжения // Фундаментальные исследования. – 2012. - № 9 (ч. 3). – С. 656-661.
5. Ланграф С.В. Асинхронный моментный электропривод с векторным управлением для имитации усилий запорной арматуры магистральных нефтепроводов : дис. ... канд. техн. н. : 05.09.03. – Томск, 2007. – 164 с.
6. Сивохин А.В. Искусственные нейронные сети / А.В. Сивохин, А.А. Лушников, С.В. Шибанов. – Пенза : Пенз. гос. ун-т, 2004. – С. 136.
7. Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С., Ланграф С.В. Прямое управление моментом асинхронного двигателя на основе уточнённой модели токов стержней ротора без использования датчиков механических и магнитных переменных // Изв. вузов. Электромеханика. – 2011. - № 1. – С. 51-56.

8. Bose Bimal K. Modern power electronics and AC drives / Bimal Bose. - Prentice Hall PTR, 2002. - 771 с.

**Рецензенты:**

Усов Ю.П., д.т.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Исаев Ю.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры ЭСиЭ ЭНИН ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.