



ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ БЕЗДАТЧИКОВЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ

А.В. Синюков¹, Т.В. Синюкова¹, Е.И. Грачева², М. Kolcun³, S Valtchev⁴

¹Липецкий государственный технический университет,
г. Липецк, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия

³Technical University of Kosice, Bratislava

⁴New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, zeitsn@yandex.ru

Резюме: ЦЕЛЬ. Исследование системы управления механизмом передвижения груза при использовании разных вариантов бездатчикового управления. Поиск оптимального варианта, при котором формирование скорости происходит идентично данным, полученным с датчика скорости. Анализ полученных при исследовании результатов, в том числе, результатов, полученных с учетом нагрева обмоток двигателя. МЕТОДЫ. Задачи, поставленные при выполнении исследования, реализуются путем имитационного моделирования в среде компьютерного моделирования Matlab Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье рассмотрены системы с разными типами наблюдателей скорости. Реализована система учитывающая нагрев обмоток статора и ротора асинхронного двигателя, в который были внедрены неадаптивный наблюдатель и разные типы нейросетевого контроллера. Предложен совмещенный способ использования нейросетевых регуляторов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Бездатчиковые системы управления актуальны для использования на производствах с присутствием, по условиям технологического процесса, высоких температур. Проведенные исследования показали, что использование нейросетевых технологий позволяет работать с параметрами разного уровня и типа. Предложенный метод, подразумевающий использование совместной работы нейросетевых наблюдателей с различной нейроструктурой позволяет осуществлять отработку скорости во всем диапазоне. Присутствующая в предлагаемой структуре связь с облачным хранилищем ведет к разгрузке системы управления, позволяя увеличить процесс анализа данных, поступающих с объекта.

Ключевые слова: Бездатчиковые системы управления; наблюдатель; моделирование; асинхронный двигатель; Matlab Simulink.

Для цитирования: Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Kolcun М., Valtchev S Оптимизированные бездатчиковые системы управления механизмами перемещения грузов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 6. С. 87-98. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-87-98.

OPTIMIZED SENSORLESS CONTROL SYSTEMS FOR CARGO MOVEMENT MECHANISMS

AV. Sinyukov¹, TV. Sinyukova¹, EI. Gracheva², M. Kolcun³, S Valtchev⁴

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

³Technical University of Kosice, Bratislava

⁴New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, zeitsn@yandex.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Investigation of the control system of the cargo movement mechanism when using different variants of sensorless control. The search for the optimal option, in which the formation of the speed is identical to the data obtained from the speed sensor. Analysis of the results obtained during the study, including the results obtained taking into account the heating of the motor windings. *METHODS.* The tasks set during the research are implemented by simulation modeling using the Matlab Simulink computer simulation environment. *RESULTS.* The article considers systems with different types of velocity observers. A system is implemented that takes into account the heating of the stator and rotor windings of an asynchronous motor, in which a non-adaptive observer and different types of neural network controller were introduced. A combined method of using neural network regulators is proposed. *CONCLUSION.* Sensorless control systems are relevant for use in industries with the presence, according to the conditions of the technological process, of high temperatures. The conducted research has shown that the use of neural network technologies allows you to work with settings of different levels and types. The proposed method, implying the use of joint work of neural network observers with various neurostructures, allows for speed testing in the entire range. The connection with cloud storage present in the proposed structure leads to the unloading of the management system, allowing to increase the process of analyzing data coming from the object.

Keywords: *Sensorless control systems; observers; simulation; asynchronous motor; Matlab Simulink.*

For citation: Sinyukov AV, Sinyukova TV, Gracheva EI, Kolcun M., Valtchev S. Optimized sensorless control systems for cargo movement mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(6):87-98. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-6-87-98.

Введение

На предприятиях, где работа электродвигателей происходит при повышенных температурах, актуально использование бездатчиковых систем управления.

Объектами исследования являются механизмы передвижения, на которых установлен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором управляемый частотным преобразователем.

Согласно литературе [1] существует несколько способов частотного управления, каждый из них имеет свои особенности, достоинства и недостатки:

- скалярное управление, базирующееся на математическом аппарате, реализованном в установившемся режиме. Данная система не точна в динамике при повышенной точности отработки статических характеристик [2, 3];

- векторное управление – имеет хорошие динамические показатели при использовании. В основе лежит не только изменение частоты, но и параметров двигателя [4-6];

- прямое управление моментом – характеризуется хорошей реакцией момента на управляющий сигнал [7, 8].

Для исследования была выбрана векторная система управления.

Применение бездатчикового управления позволяет повысить управляемость и экономические показатели системы, приводит к совершенствованию базовых законов частотного управления, снижает стоимость устройства [9-12].

Предлагаемая методика дает возможность исключить из системы дополнительные датчики, использование которых ведет к увеличению габаритов устройства в целом, а также, при наличии на предприятии негативных факторов окружающей среды, приводит к появлению большой погрешности показаний, оставив для адекватной работы системы только встроенные в частотный преобразователь датчики. Значение скорости, при таком подходе, фиксируется косвенно на основании доступных для измерения параметров, используемых в системе для других целей.

В настоящее время бездатчиковое управление представлено разными методиками исполнения, отличающимися степенью сложности при реализации. Предпочтение тому или иному методу отдается в зависимости от требований, предъявляемых к системе управления, в нашем случае, определяющими критериями являются диапазон управления скоростью и точность ее определения.

На основании анализа методов бездатчикового определения скорости, с учетом достоинств и недостатков рассматриваемых систем, сложности понимания и реализации

подхода, предпочтение было отдано неадаптивному типу наблюдателей и адаптивному нейросетевому наблюдателю [13, 14].

Материалы и методы

Схемное решение в среде Matlab Simulink асинхронного двигателя и системы управления двигателем

В среде *Matlab Simulink* согласно математическому аппарату, приведенному в [1] собрана схема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (рис. 1). В основе лежит Т-образная схема замещения, реализованная посредством математических операций, описывающих переходные процессы, происходящие в асинхронном двигателе, выбранная при моделировании система координат является неподвижной.

Следующим этапом стала разработка в среде *Matlab Simulink* векторной системы управления для привода перемещения груза.

Реализация системы с неадаптивными наблюдателями

Реализация неадаптивных наблюдателей завязана на математике, лежащей в основе работы асинхронного двигателя в неподвижной системе координат. Значение скорости, в наблюдателях токаго типа определяется через известные параметры несколькими способами, одним из вариантов является метод, базирующийся на данных о напряжении и токе статора, величине частоты питающего напряжения и значении частоты роторной электродвижущей силы [15]. Математическая модель такого типа наблюдателя приведена на рисунке 2.

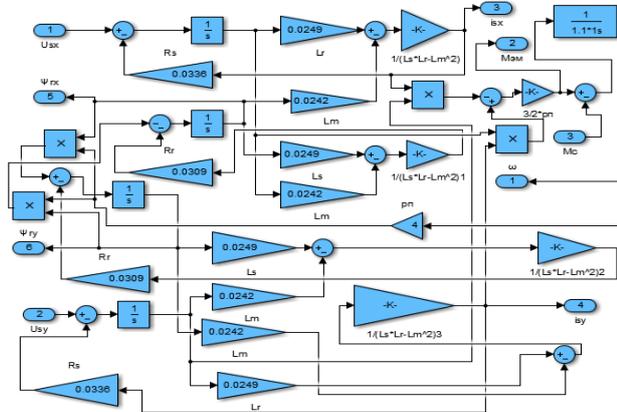


Рис. 1. Модель асинхронного двигателя в среде Matlab Simulink

Fig.1. Asynchronous motor model in Matlab Simulink

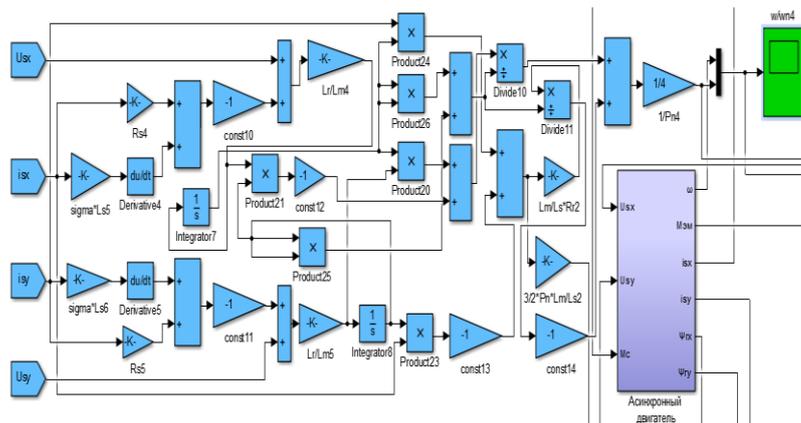


Рис. 2. Модель неадаптивного наблюдателя

Fig.2. Adaptive Observer model

На рисунке 3 представлен график изменения скорости при моделировании в среде *Matlab Simulink* системы с неадаптивным типом наблюдателя, данные с которого сравниваются с данными с датчика скорости, роль которого выполняет сигнал по скорости выведенный из модели асинхронного двигателя. Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод об адекватной работе принятого для исследования неадаптивного наблюдателя. Рассхождение графиков скорости фиксируется примерно на уровне 0,15%.

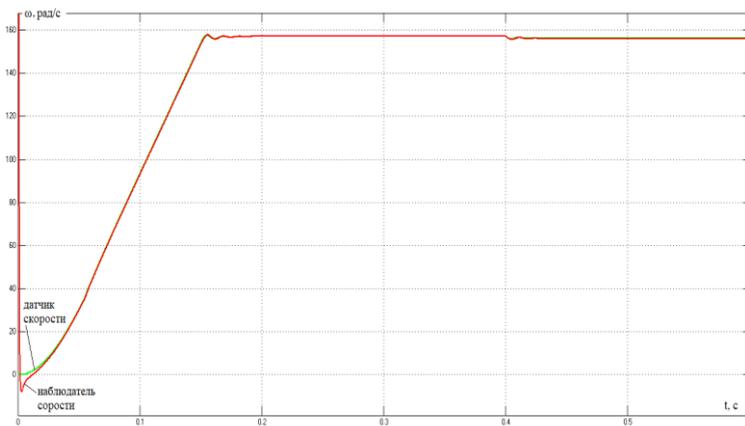


Рис. 3. Зависимость скорости от времени в системе с неадаптивным наблюдателем и датчиком скорости

Fig. 3. The dependence of speed on time in a system with a non-adaptive observer and a speed sensor

Реализация системы с учетом нагрева обмоток двигателя

Реализованный в среде *Matlab Simulink* неадаптивный наблюдатель скорости не имеет возможности осуществлять учет нагрева обмоток двигателя в процессе его работы. Для решения данной проблемы были внесены корректировки в математическую модель асинхронного двигателя, что позволило снять показания скорости двигателя получаемые с датчика скорости и посредством неадаптивного наблюдателя при различных значениях нагрева обмоток двигателя. Приведенная на рисунке 4 схема асинхронного двигателя отражает состояние системы, когда обмотки двигателя нагреваются на четверть от номинальных значений.

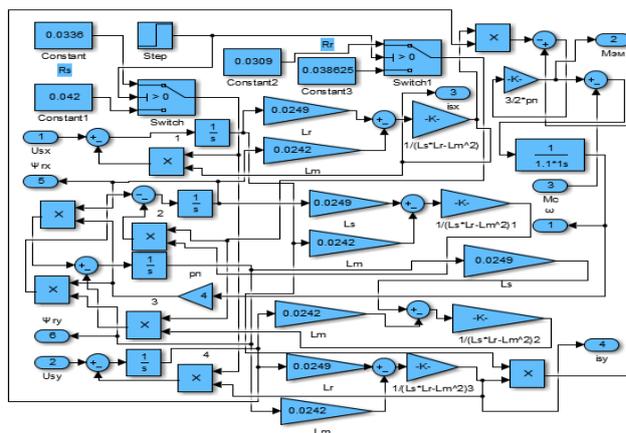


Рис. 4. Модель двигателя в среде *Matlab Simulink*, учитывающая нагрев обмоток двигателя

Fig.4. An engine model in the *Matlab Simulink* environment that takes into account the heating of the engine windings

На рисунке 5 представлены, полученные в результате моделирования предлагаемой системы характеристики. Анализ полученных графиков скорости позволяет сделать вывод о наличии ошибки в процессе выхода скорости в системе с неадаптивным наблюдателем на значение, которое по данным с датчика скорости является установившимся, также присутствует явно выраженный колебательный характер в диапазоне выхода характеристики с неадаптивным наблюдателем на номинальное значение. Использование наблюдателя скорости в системе с изменением сопротивлений статора и ротора в результате нагрева обмоток приводит к появлению ошибки пропорциональной величине нагрева обмоток двигателя.

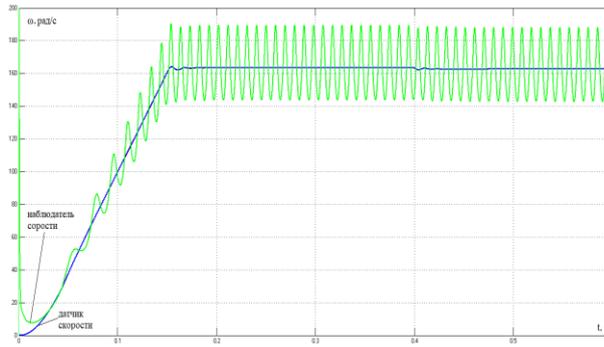


Рис. 5. Зависимость скорости от времени в системе, учитывающей нагрев обмоток *Fig.5. The dependence of speed on time in a system that takes into account the heating of the windings*

Реализация системы с нейросетевыми наблюдателями

Нейросетевые системы занимают в последнее время прочные позиции во многих областях человеческой деятельности благодаря таким возможностям нейронной сети, как умение обучаться в процессе решения поставленных задач, умение осуществлять прогноз предстоящих событий.

Для дальнейшего исследования из библиотеки *Neural Network Toolbox* выбран нейронный контроллер *NARMA-L2* с линеаризованной обратной связью. Выбор на данном типе наблюдателя остановлен в связи с тем, что для его функционирования не нужны значительные вычислительные затраты. Представленная на рисунке 6 структура наблюдателя получена путем введения обучающего массива данных и задания параметров, являющихся ключевыми для архитектуры сети.

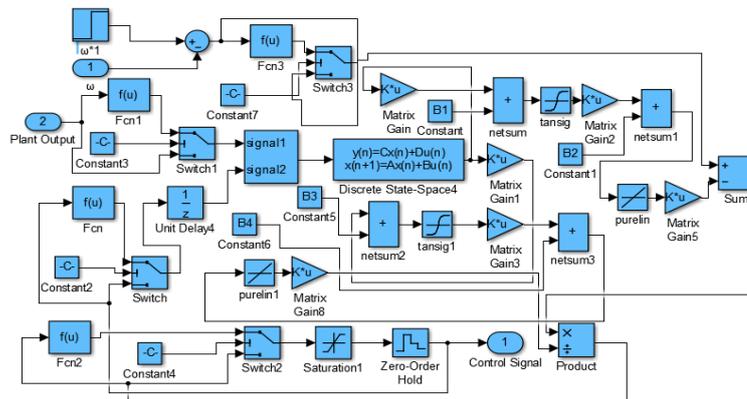


Рис. 6. Структура нейроконтроллера *NARMA-L2* *Fig. 6. The structure of the NARMA-L2 neurocontroller*

На следующем этапе необходимо выполнить процесс обучения сети с нейронной структурой. В исследовании для этих целей выбрана методика Левенберга-Маркара, обладающая приемлемым показателем точности алгоритмов осуществляющих процесс обучения сети с нейронной структурой.

Объединенные результаты моделирования переходного процесса по скорости в трех системах – с датчиком скорости, с неадаптивным наблюдателем и с нейросетевым контроллером представлены на рисунке 7.

На основании представленных, на рисунке 7 графиков скорости можно сделать вывод, что применение нейросетевого контроллера увеличивает точность отработки скорости, позволяет устранить колебания, возникающие в переходных процессах при использовании наблюдателя неадаптивного типа. Выход скорости на установившийся режим также показал хорошую точность отработки при использовании наблюдателя нейросетевого типа.

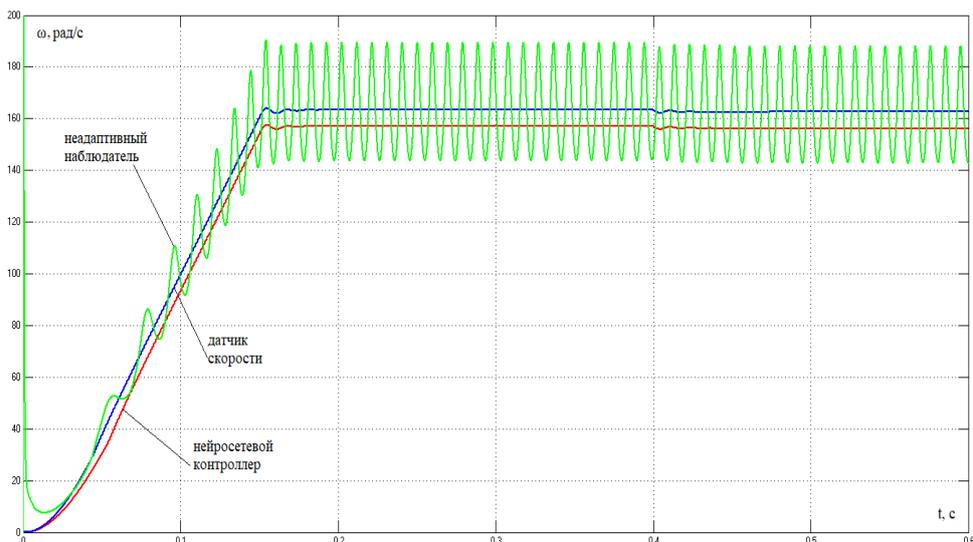


Рис. 7. Временные характеристики скорости

Fig. 7. Temporary speed characteristics

Следующим наблюдателем, для исследования стал *Predictive* нейроконтроллер, принцип его работы основан на прогнозировании реакций, которые могут возникнуть у объекта на разного типа управляющие сигналы. В структуре данного типа нейроконтроллера присутствует алгоритм адаптации, в функции которого входит вычисление сигналов управления таким образом, чтобы они позволяли оптимизировать отклик с управляемого объекта. Задав необходимые параметры и выполнив необходимые настройки, получим структурную схему *Predictive Controller*, представленную на рисунке 8.

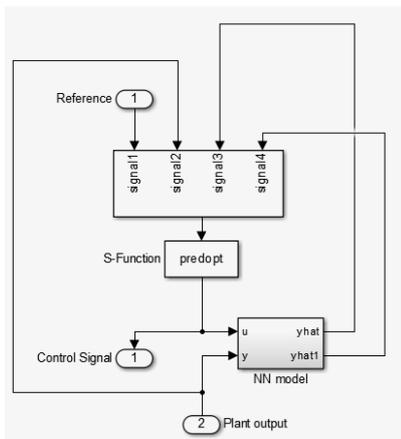


Рис. 8. Структура нейроконтроллера *Predictive Controller*

Fig. 8. Structure of the *Predictive Controller* neurocontroller

Структура блока *NN model* представлена на рисунке 9.

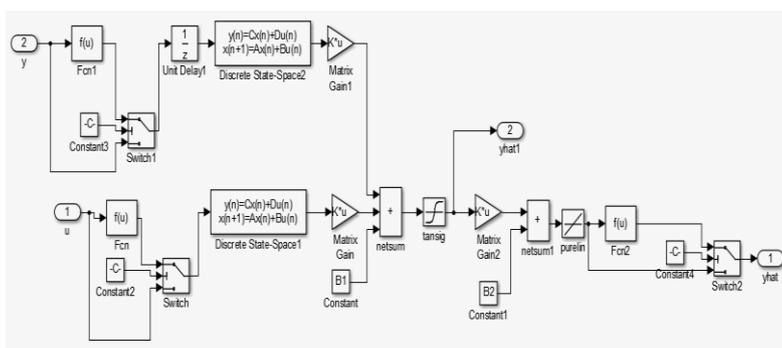


Рис. 9. Блок *Predictive Controller*

Fig. 9. *Predictive Controller* Block

Результаты моделирования приведены на рисунке 10. Также, как и в предыдущем исследовании, использование нейросетевого наблюдателя *Predictive Controller* позволяет получить приемлемые скоростные характеристики как в переходном, так и в установившемся режиме.

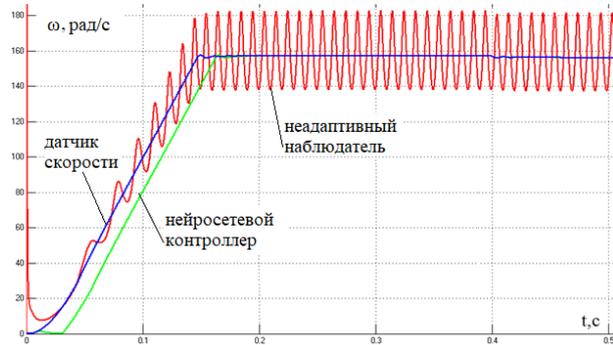


Рис.10. Графики скорости

Fig. 10. Speed charts

Еще одним типом нейросетевого наблюдателя является *Model Reference Controller* (рис. 11), данный регулятор имеет двухфакторную систему обучения, обучение одной из которых осуществляется в режиме оффлайн.

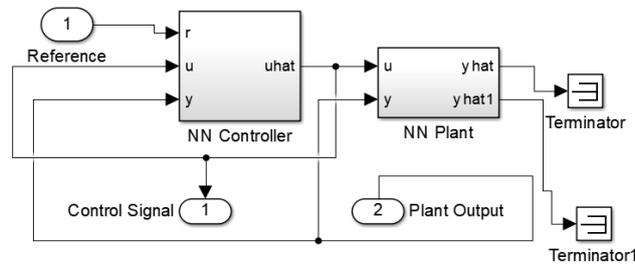


Рис.11. Эталонный контроллер модели

Fig. 11. Model Reference Controller

Внутренняя структура блоков *NN Controller* и *NN Plant* представлена на рисунках 12 и 13.

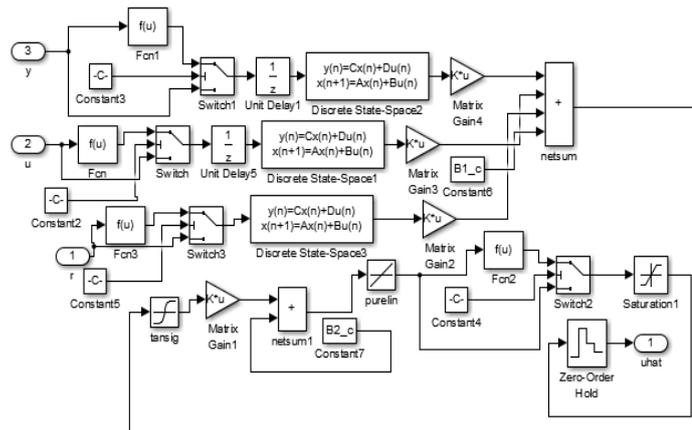


Рис.12. Структура блока *NN Controller*

Fig. 12. Structure of the *NN Controller* block

Путем моделирования в среде *Matlab* выполнено исследование устойчивости работы данного типа наблюдателя. Результаты, приведенные на рисунке 14 позволяют сделать вывод об адекватной и приемлемой работе и данного типа нейросетевого наблюдателя.

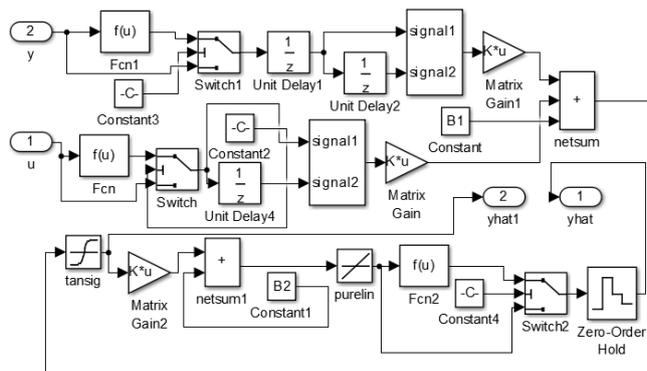


Рис.13. Структура блока NN Plant

Fig. 13. Structure of the NN Plant block

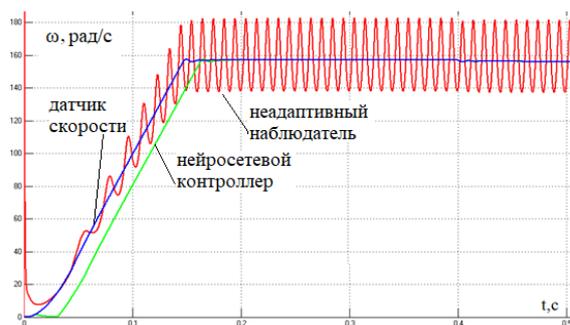


Рис.14. Поведение скорости, в системах с разными типами наблюдателей

Fig. 14. Speed behavior, in systems with different types of observers

Результаты и Обсуждение

Анализ результатов моделирования систем с разными типами нейросетевых контроллеров показал их хорошую робастность. Но есть значительные недостатки у наблюдателей такого типа в виде большой нагрузки на аппаратные ресурсы, с которой могут справиться не все процессоры. Частичная разгрузка систем возможна при использовании совмещенной работы наблюдателей неадаптивного и нейросетевого типа.

Использование неадаптивного наблюдателя целесообразно в установившихся режимах, а при переходных процессах оптимальным является работа нейросетевого наблюдателя.

Принцип действия предлагаемой совмещенной системы заключается в следующем, сигнал задания из системы управления поступает на один из типов наблюдателей, в зависимости от его характера, с наблюдателей сигнал подается на механизм адаптации, а с него снова в систему управления.

Графики, полученные в результате моделирования, представлены на рисунке15.

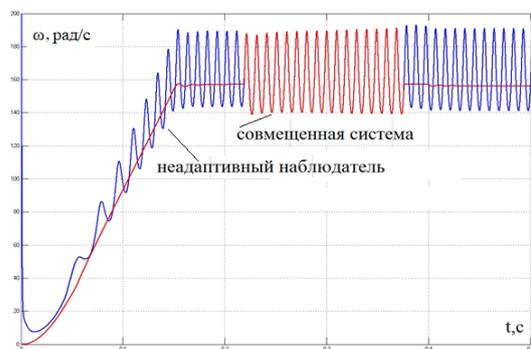


Рис.15. Формирование скорости, в совмещенной системе и в системе с неадаптивным

Fig. 15. Speed formation, in a combined system and in a system with a non-adaptive

Предлагаемое решение показало, что система работоспособна, однако присутствуют явно выраженные колебательные процессы в установившихся режимах.

Дальнейшее исследование было направлено на подбор оптимального соотношения работы различных типов наблюдателей с совмещенной системе.

Бездатчиковые системы актуальны для исследования и внедрения на действующие механизмы. Реализация таких систем возможна с использованием облачного хранилища, в которое поступают данные со *Smart Sensor*, далее данные подлежат обработке, а после этого применяются для обучения нейросетевых регуляторов. Данная технология дает возможность использовать наблюдатели с нейроструктурами, обучение которых происходит по разным исходным параметрам в одной системе. Каждый из наблюдателей будет выполнять свои функции.

Предлагается система с двумя нейросетевыми наблюдателями (рис. 16), на вход первого поступает значение заданного параметра скорости, второй наблюдатель реагирует на величину нагрева обмоток двигателя. Выходные сигналы с наблюдателей поступают на механизм адаптации, который осуществляет коррекцию функционирования системы, базируясь на данных, заложенных в системе обучения и данных о температурном состоянии обмоток, путем введения в работу в текущий момент времени одного из наблюдателей.

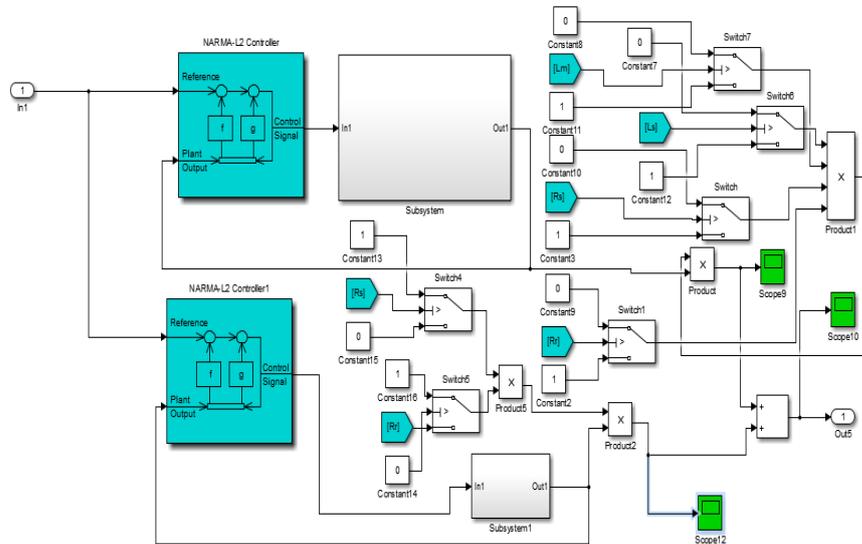


Рис.16. Система с совмещенной работой нейросетевых наблюдателей

Fig. 16. A system with combined work of neural network observers

Результаты моделирования представлены на рисунке 17. Полученная характеристика не имеет колебаний на всей протяженности, отработка скорости идет во всем диапазоне.

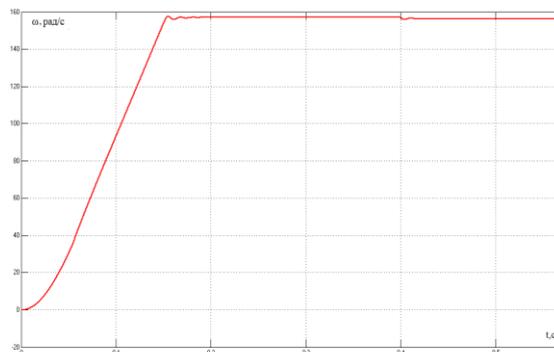


Рис.17. Формирование скорости, в совмещенной системе

Fig. 17. Speed formation, in a combined system

Предложенный вариант совмещенного функционирования нейросетевых регуляторов, имеющий связь с облачными хранилищами, позволит разгрузить нагрузку на

систему управления электроприводом, приведя к увеличению скорости анализа данных на этом уровне.

Выводы

Использование бездатчиковых систем управления снижает габариты устройств, делает их применение возможным на объектах с повышенными температурами.

Реализованные нейросетевые наблюдатели позволили избавиться от колебательного характера скорости, присущего системам с неадаптивными наблюдателями.

Нейросетевые регуляторы позволяют работать с данными разного типа и уровня автоматизации.

Применение облачных пространств позволяет снизить нагрузку на аппаратную часть.

Литература

1. Соколовский Г.Г., Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия. 2006. 265 с.
2. Фираго Б.И., Александровский С.В. Свойства, характеристики и параметры синхронного двигателя постоянными магнитами при векторном и скалярном частотном управлении // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2019. Т. 62. № 3. С.205-218.
3. Shayakhmetova L.V., Kharitonov V.L. Stabilization of a scalar equation with delay in the state and control variables // Vestnik of saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. 2014. № 4. pp. 144-150.
4. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Vladimirov O. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems // E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020), Saint-Petersburg, Russia. 2020. V. 220. 01059, October 29-30.
5. Meshcheryakov V., Sinyukova T., Sinyukov A., Boikov A., Mukhametzhanov R. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor // High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
6. Даденков Д.А., Солоцкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 11. С.117-128.
7. Chunyun Fu, Minghui Hu. Adaptive sliding mode-based direct yaw moment control for electric vehicles // 2015 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). Changshu, China, 2015, 15634631, October 29-31.
8. Sayali S. Patil, Vijayraj Wanaskar, P.D. Shendge, Phadke S. B. Sliding Mode and Inertial Delay Based Direct Yaw Moment Control for AGVs // 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India. 20593534. (2-4 April 2021).
9. Синюков А.В., Синюкова Т.В. Наблюдатели состояния в системах управления электроприводом с синхронным двигателем // Системы управления электротехническими объектами (СУЭТО-8): труды восьмой всероссийской научно-практической конференции, Тула. 2018. С. 64–66.
10. Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю. Модель асинхронного двигателя для бездатчиковых информационно-управляющих систем автоматизированного электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 1 (113). С. 111-120.
11. Gracheva Y.I., Chernova N.V., Fedotov A.I., Fedotov E.A. Local Fourier transformation application for mathematic modeling of synchronous machine valve actuator, Journal of engineering and applied sciences. 2016. V.11. №1. 2939-2945.
12. Mairaj Ali, Muwahida Liaquat. Comparison Between Distributed Observer And Adaptive Distributed Observer // 2018 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). Maharashtra, India. 2018. 18132759 (15-17 June).
13. Mikhail P. Belov, Nguyen Van Lanh, Tran Dang Khoa. State Observer based Elman Recurrent Neural Network for Electric Drive of Optical-Mechanical Complexes // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2021. St. Petersburg, Moscow, Russia. 20553530. (26-29 January).
14. Hu Z., Bodyanskiy Y.V., Tyshchenko O.K., A Multidimensional Adaptive Growing

Neuro-Fuzzy System and Its Online Learning Procedure // *Advances in Intelligent System and Computing* 689. 2018. pp. 186-203.

15. Скляр А.В., Чижма С.Н., Чегодаев Ф.В. Бездатчиковый контроль частоты вращения ротора асинхронного двигателя // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2017. Т. 60. № 1. С.14-19.

Авторы публикации

Синюков Алексей Владимирович – аспирант, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, e-mail: zeitsn@yandex.ru.

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, e-mail: stw0411@mail.ru.

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Michal Kolcun – professor, Technical University of Kosice.

Stanimir Valtchev – New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria.

References

1. Sokolovsky GG. *Alternating current electric drives with frequency control*. М.: Academy. 2006. 265 p.

2. Firago BI, Alexandrovsky SV. Fananana, ny toetra sy ny masontsivana ny synchronous maotera amin'ny maharitra lasibatra ao vector sy scalar matetika fanaraha-maso. *Angovo. Fitsarana ambony toeram-pampianarana sy ny hery-ny fikambanana ny CIS*. 2019;62(3):205-218.

3. Shayakhmetova LV, Kharitonov VL. Stabilization of a scalar equation with delay in the state and control variables. *Vestnik of saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*. 2014;4:144-150.

4. Meshcheryakov V, Sinyukova T, Sinyukov A, et al. Analysis of the effectiveness of using the block for limiting the vibrations of the load on the mechanism of movement of the bogie with various control systems. *E3S Web of Conferences. Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020)*, Saint-Petersburg, Russia, 2020, 220, 01059, October 29-30.

5. Meshcheryakov V, Sinykova T, Sinyukov A, et al. Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor. *High Speed Turbomachines and Electrical Drevs Conference 2020 (HSTED-2020)*, Prague, Czech Republic.

6. Dadenkov DA, Solotskii EM, Shachkov AM. Modelirovanie sistemy vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem v pakete Matlab/Simulink. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universitete. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2018;11:117-128.

7. Chunyun Fu, Minghui Hu. *Adaptive sliding mode-based direct yaw moment control for electric vehicles*. 2015 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). Changshu, China, 2015, 15634631, October 29-31.

8. Sayali S. Patil, Vijayraj Wanaskar, PD. Shendge, et al. *Sliding Mode and Inertial Delay Based Direct Yaw Moment Control for AGVs*. 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Maharashtra, India. 20593534. (2-4 April 2021).

9. Sinyukov AV, Sinyukova TV. *Observers of the state in control systems of an electric drive with an asynchronous motor*. Control systems of electrotechnical objects (SUETO-8): proceedings of the eighth All-Russian Scientific and practical conference, Tula. 2018. pp. 64-66.

10. Ostrovlyanchik VYu. Popolzen IYu. Asynchronous motor model for sensorless information and control systems of automated electric drive. *Bulletin of the Kuzbass State Technical Un1* (113). pp. 111-120.

11. Gracheva YI, Chernova NV, Fedotov AI, Fedotov EA. Local Fourier transformation application for mathematic modeling of synchronous machine valve actuator. *Journal of engineering and applied sciences*. 2016;11(1):2939-2945.

12. Mairaj Ali, Muwahida Liaquat. *Comparison Between Distributed Observer And*

Adaptive Distributed Observer. 2018 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). Maharashtra, India. 2018. 18132759 (15-17 June).

13. Mikhail P. Belov, Nguyen Van Lanh, Tran Dang Khoa. *State Observer based Elman Recurrent Neural Network for Electric Drive of Optical-Mechanical Complexes*. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2021. St. Petersburg, Moscow, Russia. 20553530. (26-29 January).

14. Hu Z, Bodyanskiy YV, Tyshchenko OK, A *Multidimensional Adaptive Growing Neuro-Fuzzy System and Its Online Learning Procedure*. Advances in Intelligent System and Computing. 689, 2018;689:186-203.

15. Sklyar AV, Chizhma SN, Chegodaev FV. Sensorless control of the rotor speed of an asynchronous motor. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 2017;60(1):14-19.

Authors of the publication

Alexey V. Sinyukov – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Tatyana V. Sinyukova – Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Michal Kolcun – Technical University of Kosice.

Stanimir Valtchev – New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria.

Получено *02.12.2021 г.*

Отредактировано *03.12.2021 г.*

Принято *06.12.2021 г.*