



## НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМАМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ГРУЗОВ

А.В. Синюков<sup>1</sup>, Т.В. Синюкова<sup>1</sup>, Е.И. Грачева<sup>2</sup>, Michal Kolcun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

<sup>3</sup>Technical University of Kosice.

ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, [zeitsn@yandex.ru](mailto:zeitsn@yandex.ru)

**Резюме:** ЦЕЛЬ. Разработка и анализ систем управления для механизмов перемещения грузов, не содержащих в своей структуре датчик скорости. Использование интеллектуальных устройств при реализации бездатчиковых систем управления. Исследование предлагаемых решений в системах замкнутого типа с целью выявления наиболее оптимального варианта, обеспечивающего наилучшие показатели по предъявляемым критериям, в данном случае – точности отработки скорости. МЕТОДЫ. Добиться поставленных целей возможно за счет использования математического моделирования, осуществляемого в среде имитационного моделирования Matlab Simulink. РЕЗУЛЬТАТЫ. При исследовании производился анализ систем содержащих в своей структуре наблюдатели скорости разного рода. Устойчивость работы рассматриваемых наблюдателей оценивалась с учетом внешних возмущающих воздействий – рассмотрен режим межвиткового замыкания. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование систем управления, не имеющих в своей структуре датчиков, востребовано на механизмах, установленных в помещениях с небольшой площадью, на объектах с повышенными температурами окружающей среды и при ее повышенном загрязнении. При исследовании осуществлялось сравнение систем с датчиком скорости, системы, содержащей неадаптивный наблюдатель и систем с нейросетевыми наблюдателями. Оптимальные показатели были получены в системе, содержащей нейроконтроллер NARMA-L2. Предложена совмещенная структура, содержащая несколько нейрорегуляторов, которые обучаются на динамические параметры двигателя и отслеживаемые опасные режимы, которые могут возникнуть в динамике.

**Ключевые слова:** Нейронная сеть; контроллер; имитационное моделирование; асинхронный двигатель; Matlab Simulink.

**Для цитирования:** Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И. Нейросетевые технологии в системах управления механизмами перемещения грузов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 2. С. 108-118. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-107-118.

## NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES IN CONTROL SYSTEMS OF CARGO MOVEMENT MECHANISMS

AV. Sinyukov<sup>1</sup>, TV. Sinyukova<sup>1</sup>, EI. Gracheva<sup>2</sup>, Michal Kolcun<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

<sup>2</sup>Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

<sup>3</sup>Technical University of Kosice.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9478-2477>, [zeitsn@yandex.ru](mailto:zeitsn@yandex.ru)

**Abstract:** THE PURPOSE. Development and analysis of control systems for cargo movement mechanisms that do not contain a speed sensor in their structure. The use of intelligent devices in the implementation of sensorless control systems. The study of the proposed solutions in closed-type systems in order to identify the most optimal option that provides the best performance according to the criteria, in this case, the accuracy of speed testing. METHODS. It is possible to achieve these goals through the use of mathematical modeling carried out in the

*Matlab Simulink simulation environment. RESULTS. In the study, the analysis of systems containing various kinds of velocity observers in their structure was carried out. The stability of the work of the observers under consideration was evaluated taking into account external disturbing influences – the inter-turn closure mode was considered. CONCLUSION. The use of control systems that do not have sensors in their structure is in demand on mechanisms installed in rooms with a small area, on objects with elevated ambient temperatures and with increased pollution. The study compared systems with a speed sensor, a system containing a non-adaptive observer and systems with neural network observers. Optimal indicators were obtained in a system containing a NARMA-L2 neurocontroller. A combined structure is proposed containing several neuroregulators that are trained for dynamic engine parameters and monitored dangerous modes that may occur in dynamics..*

**Keywords:** Neural network; controller; simulation; asynchronous motor; Matlab Simulink.

**For citation:** Sinyukov AV., Sinyukova TV, Gracheva EI. Neural network technologies in control systems of cargo movement mechanisms. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022; 24(2):107-118. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-2-107-118.

### **Введение**

К работе оборудования, задействованного в ответственном технологическом процессе, предъявляются повышенные требования с позиций надежности, так как данный параметр влияет на обеспечение безотказного функционирования всего процесса производства. Избежать простой оборудования, связанный с необходимостью проведения ремонтных работ возможно за счет отказа от датчиков скорости в пользу бездатчиковых систем управления [1], реализация которых возможна как на базе неадаптивных наблюдателей, так и с применением нейроконтроллеров.

На механизмах перемещения грузов устанавливаются как двигатели постоянного тока, так и двигатели переменного тока. Наибольшее применение в последнее время получили двигатели переменного тока, которые показали себя, при использовании правильно выбранной системы управления, по динамическим показателям не хуже двигателей постоянного тока. Значительным преимуществом двигателей переменного тока являются меньшие, по сравнению с двигателем постоянного тока, габаритные размеры, отсутствие элементов, нуждающихся в постоянном контроле и обслуживании [2, 3].

В качестве систем управления, позволяющих получить характеристики схожие с двигателями постоянного тока, наиболее хорошо себя зарекомендовали частотно-регулируемые системы, представителями которых являются скалярные [4, 5] и векторные [6, 7] методы управления. Для исследования выбрана векторная система управления, в связи с простотой ее реализации из-за отсутствия сложного математического аппарата характерного для скалярной системы управления.

Бездатчиковые системы управления находят широкое применение благодаря относительной простоте реализации и повышенной точности определяемых показателей. Существует несколько методов, позволяющих реализовать бездатчиковые методы нахождения значения скорости:

- в основе лежит математический аппарат, основанный на данных о значениях напряжения статора, тока статора, определяемых путем измерения этих величин в частотном преобразователе и данных, полученных на основе расчетов [8, 9];
- адаптивный наблюдатель базируется на использовании блока адаптации, назначение которого заключается в снижении рассогласования выходных параметров блоков, реализующих эталонную и адаптивную модель [10, 11];
- наблюдатель, учитывающий конструктивные особенности двигателя. Определение скорости, базирующееся на законах нейронных сетей, дает хорошие результаты за счет робастности системы, применимости на сложных динамических объектах, точности определения параметров [12];
- наблюдатель, в основе которого лежат законы нейронных цепей [13].

Качественная работа бездатчиковой системы управления электрическим двигателем напрямую связана с типом используемого наблюдателя, точностью определенных и измеренных параметров. Для дальнейшего исследования в системах управления механизмами перемещения груза выбраны неадаптивный тип наблюдателя и наблюдатель, в основе работы которого лежат нейросетевые технологии [14, 15].

**Материалы и методы.** Система, содержащая неадаптивный наблюдатель

Работа данного типа наблюдателя базируется на вычислительных операциях, в которых исходными параметрами являются значения, полученные на основании математического описания асинхронного двигателя в системе координат, являющейся неподвижной.

Система управления электродвигателем перемещения груза, содержащая неадаптивный наблюдатель, в виде структурной схемы представлена на рисунке 1.

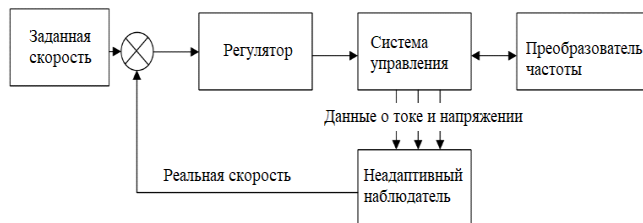


Рис. 1. Система с неадаптивным наблюдателем

Fig. 1. A system with an unadaptive observer

Адекватность работы рассматриваемого типа наблюдателя была проверена путем имитационного моделирования в среде *Matlab Simulink*, при анализе полученные в системе с неадаптивным наблюдателем показатели сравнивались с данными, выданными системой, имеющей в своей структуре датчик скорости. Результаты моделирования отражены на рисунках 2 и 3.

Графики скорости и момента показывают хорошую работоспособность предлагаемой системы. При моделировании наблюдаются небольшие расхождения между характеристиками, полученными в системе с датчиком скорости на валу двигателя и в системе, содержащей неадаптивный наблюдатель скорости.

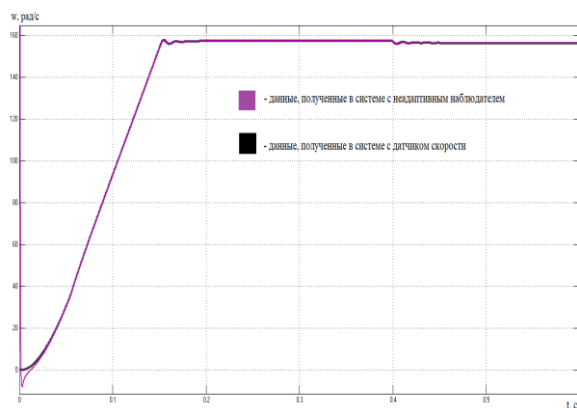


Рис. 2. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах

Fig.2. Characteristics showing the nature of velocity formation in the studied system

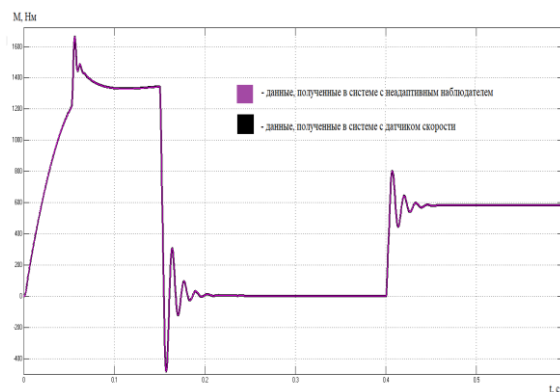


Рис. 3. Характеристики, показывающие интенсивность формирования момента в исследуемых системах

Fig. 3. Characteristics showing the nature of the moment formation in the studied systems

Система с неадаптивным наблюдателем скорости, работающая в режиме межвитковых замыканий обмоток статора

Для исследования поведение наблюдателя в режиме межвиткового замыкания статорных обмоток в исходной модели двигателя осуществлялись корректировки значений индуктивности статора  $L_s$  и индуктивности намагничивания  $L_m$ . Схема системы управления электродвигателем, содержащая неадаптивный наблюдатель скорости приведена на рисунке 4. Полученные в среде *Matlab Simulink* характеристики показаны на рисунке 5, данные полученные при изменении индуктивности сведены в таблицу 1.

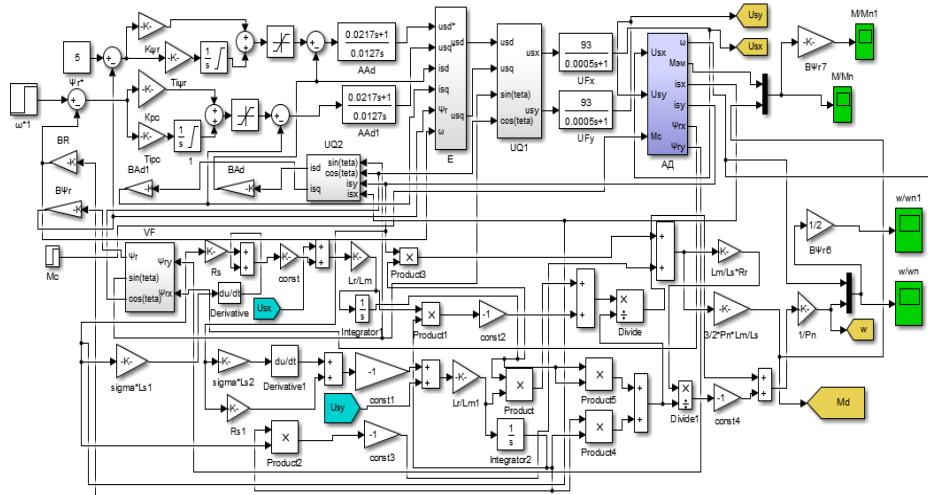


Рис. 4. Модель системы управления двигателем, содержащая неадаптивный наблюдатель в среде *Matlab Simulink*, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.4. A model of the motor control system containing a non-adaptive observer in the *Matlab Simulink* environment, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

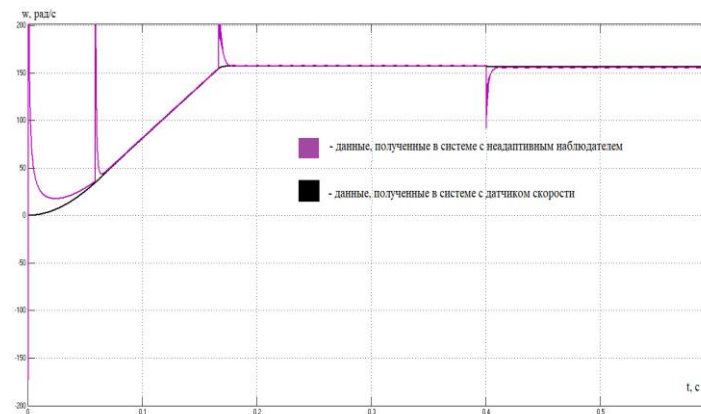


Рис. 5. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.5. Characteristics showing the intensity of velocity formation in the studied systems, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Таблица 1

Зависимость отклонения скорости от изменения индуктивности		
$L_s, \text{Гн}$	$L_m, \text{Гн}$	$\Delta w, \%$
0,023655	0,023716	0,26
0,02241	0,023232	0,33
0,021165	0,022748	0,4
0,01992	0,022264	0,6

Полученная характеристика скорости в системе с неадаптивным наблюдателем свидетельствует о присутствии колебаний. Отклонение скорости увеличивается с уменьшением индуктивности статора.

*Система с нейросетевым наблюдателем скорости на базе NARMA-L2 Controller, работающая в режиме межвитковых замыканий обмоток статора*

Применение нейронной сети в качестве наблюдателя скорости позволяет осуществлять процесс обучения при поиске решения с прогнозированием будущих событий. Реализация нейроконтроллера происходила на базе *NARMA-L2 Controller*. Данный тип контроллера позволяет перестраивать нейросетевые модели объекта управления с минимальными затратами памяти процессора на осуществление вычислений. Работа контроллера заключается в преобразовании динамики нелинейных систем в линейную динамику путем устранения нелинейностей. Разработка наблюдателя осуществляется поэтапно:

- задается массив данных, базирующихся на исходной модели;
- определяется нейросетевая архитектура наблюдателя;
- при обучении нейросети необходимо выполнить соответствующие настройки обучающих данных, численность циклов обучения, осуществить генерирование обучающей выборки;
- выполнить обучение нейросети – данный процесс является завершающим при создании нейроконтроллера типа *NARMA-L2*.

Математическая модель предлагаемой системы в среде *Matlab Simulink* представлена на рисунке 6.

Результаты имитационного моделирования отражены на рисунке 7. Как и в предыдущем исследовании устойчивое состояние наблюдателя исследовалось в режиме межвиткового замыкания, данные полученные при изменении индуктивности сведены в таблицу 2.

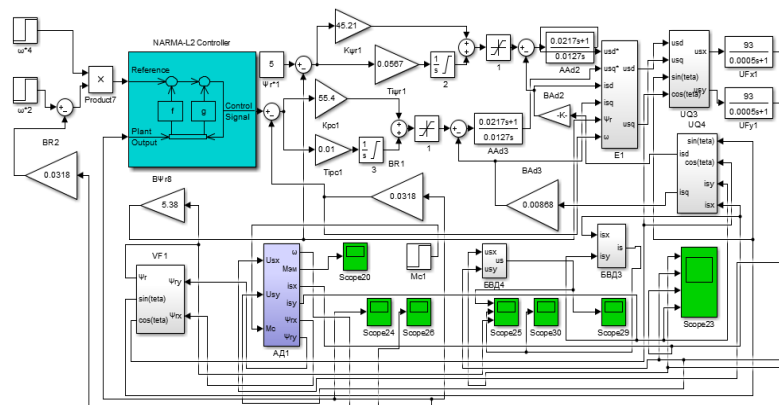


Рис. 6. Модель системы управления двигателем, содержащая наблюдатель *NARMA-L2* в среде *Matlab Simulink*, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора.

Fig. 6. A model of the engine control system containing the *NARMA-L2* observer in the *Matlab Simulink* environment, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

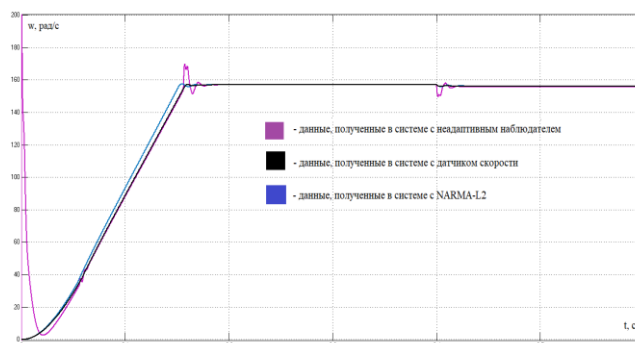


Рис. 7. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.7. Characteristics showing the intensity of velocity formation in the studied systems, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Анализ переходных процессов, позволяет сделать вывод о качественном улучшении полученных характеристик. Удалось избавиться от неустойчивого состояния скоростной характеристики, наблюдавшегося при использовании неадаптивного

наблюдателя, установившийся режим характеризуется хорошей точностью отработки наблюдателя.

Таблица 2

Показания наблюдателя скорости в режиме межвитковых замыканий		
$L_s$ , Гн	$L_m$ , Гн	$\Delta\omega$ , %
0,023655	0,023716	$2,6 \cdot 10^{-4}$
0,02241	0,023232	$3 \cdot 10^{-4}$
0,021165	0,022748	$4 \cdot 10^{-4}$
0,01992	0,022264	$6,2 \cdot 10^{-4}$

*Система с нейросетевым наблюдателем скорости на базе Predictive, работающая в режиме межвитковых замыканий обмоток статора*

Данный тип наблюдателя функционирует на базе прогнозирующих моделей, работающих на основе нейронных сетей. Модель позволяет предсказывать реакцию объекта на входные сигналы с целью поиска наиболее оптимального варианта управления.

Архитектура эталонного управления нейронной моделью использует две нейронные сети: сеть контроллера и сеть модели установки. Сначала идентифицируется модель установки, а затем контроллер обучается таким образом, чтобы выходные данные установки соответствовали выходным данным эталонной модели. Процесс создания нейроконтроллера данного типа происходит поэтапно: обучение эталонного контроллера модели; обучение сети – осуществляется посегментно, до тех пор, пока весь обучающий диапазон не будет предоставлен сети. Система, содержащая нейроконтроллер *Predictive Controller*, представлена на рисунке 8.

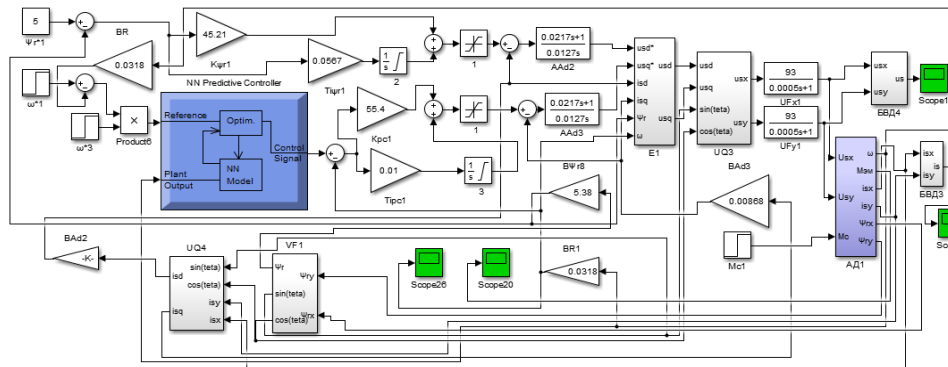


Рис. 8. Модель системы управления двигателем, содержащая *Predictive Controller* в среде *Matlab Simulink*, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig. 8. A model of the motor control system containing a *Predictive Controller* in the *Matlab Simulink* environment, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Устойчивость наблюдателя проверялась путем имитационного моделирования, полученные результаты отражены на рисунке 9.

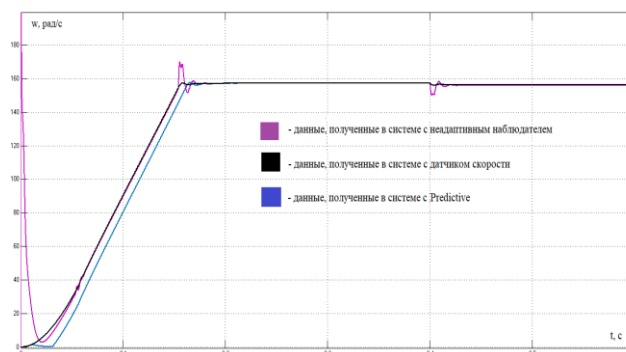


Рис. 9. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.9. Characteristics showing the intensity of velocity formation in the studied systems, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Данные полученные при изменении индуктивности сведены в таблице 3.

Таблица 3

Показания наблюдателя скорости в режиме межвитковых замыканий		
$L_s, \text{Гн}$	$L_m, \text{Гн}$	$\Delta w, \%$
0,023655	0,023716	$2,3 \cdot 10^{-4}$
0,02241	0,023232	$2,35 \cdot 10^{-4}$
0,021165	0,022748	$3 \cdot 10^{-4}$
0,01992	0,022264	$5,2 \cdot 10^{-4}$

Система с нейросетевым наблюдателем скорости на базе Model Reference Controller, работающая в режиме межвитковых замыканий обмоток статора

Model Reference Controller представляет адаптивный тип управления с эталонной моделью, где архитектура эталонного управления нейронной моделью использует две нейронные сети: сеть контроллера и сеть модели установки. Сначала идентифицируется модель установки, а затем контроллер обучается таким образом, чтобы выходные данные установки соответствовали выходным данным эталонной модели. Каждая сеть состоит из двух слоев, при реализации нейроконтроллера возможен выбор количество нейронов для использования в скрытых слоях. Внедрение Model Reference Controller в систему управления асинхронным двигателем представлено на рисунке 10.

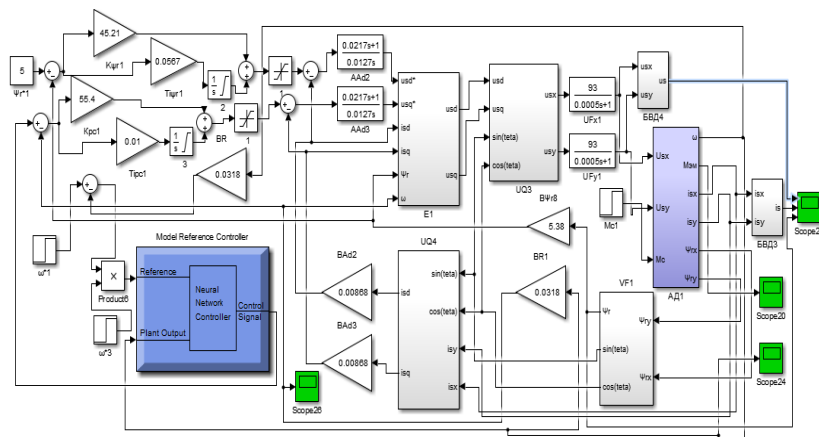


Рис.10. Модель системы управления двигателем, содержащая Reference Controller в среде Matlab Simulink, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig. 10. A model of the motor control system containing a Reference Controller in the Matlab Simulink environment, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

Как и в предыдущих исследованиях была проверена устойчивость рассматриваемого типа нейросетевого наблюдателя, данные полученные при изменении индуктивности сведены в таблицу 4, полученные результаты отражены на рисунке 11.

Таблица 4

Показания наблюдателя скорости в режиме межвитковых замыканий		
$L_s, \text{Гн}$	$L_m, \text{Гн}$	$\Delta w, \%$
0,023655	0,023716	$1,9 \cdot 10^{-4}$
0,02241	0,023232	$2 \cdot 10^{-4}$
0,021165	0,022748	$2,9 \cdot 10^{-4}$
0,01992	0,022264	$4,5 \cdot 10^{-4}$

Анализ приведенных на рисунке 11 характеристик позволяет сделать вывод о довольно устойчивой работе данного типа нейросетевого наблюдателя, не смотря на некоторое расхождение полученного сигнала скорости с показателями с датчика скорости.



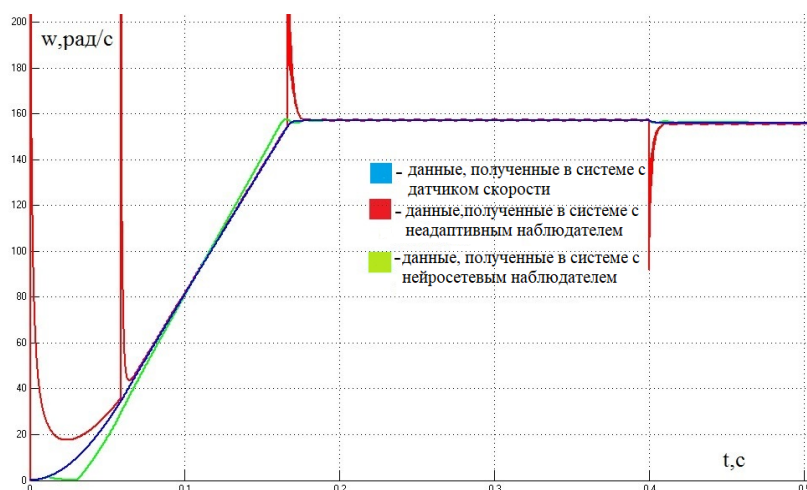


Рис. 11. Характеристики, показывающие интенсивность формирования скорости в исследуемых системах, в режиме межвиткового замыкания обмоток статора

Fig.11. Characteristics showing the intensity of velocity formation in the studied systems, in the mode of inter-turn closure of the stator windings

### Результаты и Обсуждение

Хорошие результаты при моделировании показала система содержащая нейросетевой контроллер NARMA-L2. Соответственно дальнейшее исследование целесообразно производить с использованием данного нероконтроллера.

Внедряемая в разных сферах концепция аутсорсинга производственных мощностей, реализуется посредством датчиков особого назначения с беспроводной передачей снимаемых данных и шлюза, осуществляющего сбор и передачу данных в облачное пространство, где происходит их обработка с применением машинного обучения, позволяет использовать рассмотренные наблюдатели, как носители функций разного рода, сопоставимых с интеллектуальными датчиками. Функциональная схема предлагаемой системы, содержащей несколько нейронных структур с разными исходными данными: отклонение нагрева обмоток [16], точность отработки скорости, аномалии параметров обмоток двигателя (межвитковое замыкание обмоток), используемыми для обучения, показана на рисунке 12. В системе адаптации происходит корректировка работы наблюдателя, путем переключения между нейтоконтроллерами, базируясь на необходимости корректировки того или иного, из заложенных в нейроструктуре параметров.

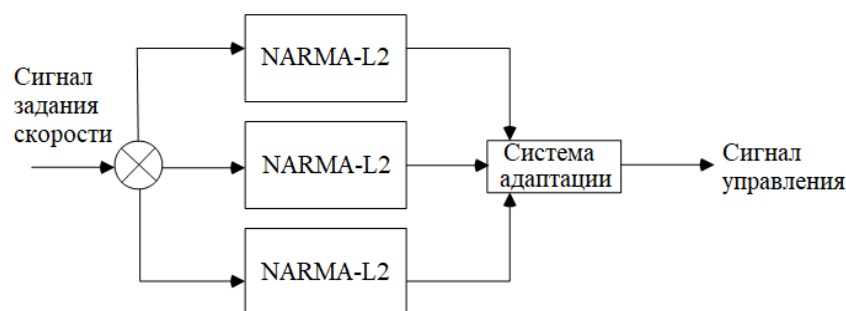


Рис.12. Система, содержащая несколько нейросетевых наблюдателей

Fig. 12. A system containing several neural network observers

Проведем имитационный режим межвитковых замыканий, являющийся самый опасным для электрического двигателя, в динамике. Для этого в режиме межвитковых замыканий осуществим резкое изменение индуктивности статора и взаимной индуктивности, результаты показаны на рисунке 13.



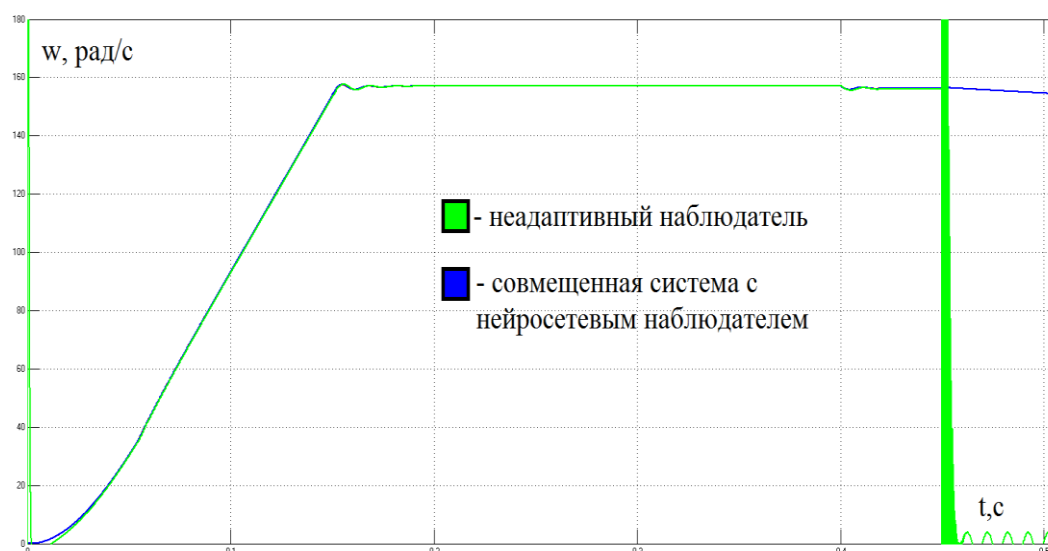


Рис.13. Формирование скорости

Fig. 13. Speed formation

Необходимо отметить, что предлагаемая модель является базовой, так как ядро системы позволяет дополнять систему нейрорегуляторами, которые будут обучены на необходимые отслеживаемые аварийные режимы и контролируемые параметры.

#### Выводы

Применение нейросетевых технологий при создании наблюдателей скорости привело к качественному улучшению их функционирования, позволило исключить статическую ошибку и нестабильность в работе, колебательный характер переходных процессов, присущий традиционным математическим аппаратам.

Нейроконтроллеры позволяют осуществлять компенсацию неучтенных внешних воздействий, приводящих к появлению возмущений в системе управления.

Предлагаемая структура системы управления, содержащая несколько нейроконтроллеров, позволит учитывать изменения параметров двигателя в процессе его работы и реагировать на появление аварийных режимов.

Исследование выполнено при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонд содействия инновациям) на основании договора №17227ГУ/2021 от 22 декабря 2021 года.

#### Литература

1. 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.
2. Козярук А.Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. – 2019. №3. С. 33-37.
3. 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, 220, 01059, October 29-30.
4. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Костылев А.В., Плотников Ю.В., Поляков В.Н., Эрман Г.З., Антонов Д.Л. Энергетическая эффективность законов скалярного частотного управления асинхронным электроприводом // Электротехника. – 2012. № 9. С. 44-47.
5. Шрейнер Р.Т., Костылев А.В., Шилин С.И., Хабаров А.И. Оптимизация асинхронного частотно-регулируемого электропривода со скалярной системой управления // Электротехника. – 2012. № 9. С. 25а-29.
6. 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.

7. 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.

8. Афанасьев К.С., Глазырин А.С. Применение расширенного фильтра Калмана для улучшения параметрической робастности бездатчикового асинхронного электропривода // Электротехнические комплексы и системы управления. - 2012. № 1. С. 2-7.

9. Ning Z.M., Demkin V., Lin Y.H., Soe Win K. Development of positioning control for automated installation of pipelines using Kalman filter based on microelectromechanical system // In the collection: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020. pp. 2591-2594.

10. Bedioui N., Houimli R., Besbes M. Adaptive observer design for sensor fault detection and reconstruction // Mechatronics, Automation, Control. - 2019. Т. 20. № 9. С. 515-523.

11. Вдовин В.В., Панкратов В.В. Синтез адаптивного наблюдателя координат бездатчикового асинхронного электропривода // Известия томского политехнического университета. - 2012. Т. 320. № 4. С. 147-153.

12. Ланграф С.В., Сапожников А.И., Глазырин А.С., Козлова Л.Е., Глазырина Т.А., Тимошкин В.В., Афанасьев К.С. Динамика электропривода с нечетким регулятором // Известия Томского политехнического университета. - 2010. Т. 316. №4. С. 168-173.

13. 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.

14. Saihi L., Bouter A. Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer // 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC 2016). - 2016. P. 48-57. 7804294.

15. Deenadayalan, A. Position Sensorless Sliding Mode Observer with Sigmoid Function for Brushless DC Motor // Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APT). - August 2012. - P. 1-6. 6302028.

16. Синюков А.В., Синюкова Т.В., Грачева Е.И., Колсун М. Оптимизированные бездатчиковые системы управления механизмами перемещения грузов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2021 г. Т. 23. № 6. С. 87-98.

#### Авторы публикации

**Синюков Алексей Владимирович** – аспирант кафедры «Электропривод» Липецкого государственного технического университета, 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.

#### References

1. 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.

2. Kozyaruk AE. Modern efficient electric drives of production and transport mechanisms. *Electrical engineering*. 2019;3:33-37.

3. 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.

4. Braslavsky IYa, Ishmatov ZSh, Kostylev AV, et al. Energy efficiency of the laws of scalar frequency control of asynchronous electric drive. *Electrical Engineering*. 2012;9:44-47.

5. Schreiner RT, Kostylev AV, Shilin SI, et al. Optimization of asynchronous frequency-controlled electric drive with scalar control system. *Electrical engineering*. 2012;9:25a-29.
6. Meshcheryakov V, Sinykova T, Sinyukov A, et al. *Modeling and analysis of vector control systems for asynchronous motor*. High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020), Prague, Czech Republic.
7. Dadenkov DA, Solotskii EM, Shachkov AM. Modelirovanie sistemy vektornogo upravleniya asinkhronnym dvigatelem v pakete Matlab/Simulink. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. 2018;11:117-128.
8. Afanasyev KS, Glazyrin AS. Application of the extended Kalman filter to improve parametric robustness of a sensorless asynchronous electric drive. *Electrotechnical complexes and control systems*. 2012;1:2-7.
9. Ning ZM, Demkin V, Lin YH, et al. *Development of positioning control for automated installation of pipelines using Kalman filter based on microelectromechanical system*. In the collection: Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020. 2020. Pp. 2591-2594.
10. Bedioui N, Houimli R, Besbes M. Adaptive observer design for sensor fault detection and reconstruction. *Mechatronics, Automation, Control*. 2019;20(9):515-523.
11. Vdovin VV, Pankratov VV. Synthesis of an adaptive observer of coordinates of a sensorless asynchronous electric drive. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*. 2012;320(4):147-153.
12. Langraf SV, Sapozhnikov AI, Glazyrin AS, et al. Dynamics of an electric drive with a fuzzy controller. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*. 2010;316(4):168-173.
13. Kozlova LE. The principle of constructing the architecture of the neuroemulator of the angular velocity of an electric drive according to the TRN – AD scheme. *Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University*. 2015;1(58):161-170.
14. Saihi L, Boutera A. *Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer*. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC 2016). 2016. P. 48-57. 7804294.
15. Deenadayalan A. Position Sensorless Sliding Mode Observer with Sigmoid Function for Brushless DC Motor. *Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APT)*. August 2012. P. 1-6. 6302028.
16. Sinyukov AV, Sinyukova TV, Gracheva EI, et al. Optimized sensorless control systems for cargo movement mechanisms. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(6):87-98.

#### **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** – professor, Technical University of Kosice.

**Получено** 26.03.2022г.

**Отредактировано** 14.04.2022г.

**Принято** 15.04.2022г.