

Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В., Синюков А.В.

Липецкий государственный технический университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ МОТАЛКИ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ СКОРОСТИ

Усовершенствование действующих объектов является актуальной темой для исследования. Механизмы металлургических предприятий, задействованные в сложном технологическом цикле, часто работают в условиях повышенных вибраций и присутствия загрязняющих компонентов в окружающей среде, данные факторы в совокупности негативно влияют на измеряющие приборы, снижая точность их измерения. Переход к бездатчиковым системам управления позволяет уменьшить габариты устройства, избавиться от погрешности измерения, возникающей из-за присутствия соединительных компонентов между датчиками и устройствами обработки информации. Повышается быстродействие системы. Все эти показатели напрямую влияют на качество выпускаемой продукции. Реализация бездатчиковых систем управления возможна за счет внедрения в систему наблюдателей скорости, которые для получения необходимых на выходе параметров используют данные, полученные в частотном преобразователе для других целей. Наблюдатели представляют математическую структуру, функционирующую по определенным правилам или алгоритмам. В работе рассмотрены несколько типов наблюдателей, выбранных на основании ряда критериев, главным из которых является простота реализации. На рассматриваемом объекте используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, управление которым осуществляется частотным преобразователем. В среде математического моделирования Matlab были разработаны: система управления приводом моталки, неадаптивный наблюдатель, наблюдатель (фильтр) Калмана, адаптивный наблюдатель со сравнением потокосцепления, адаптивный наблюдатель со сравнением ЭДС. За эталонную модель была взята система с неадаптивным наблюдателем, так как данные переходного процесса по скорости с минимальной погрешностью совпали с данными, полученными с датчика скорости. Сравнение результатов моделирования производилось на основании анализа погрешности полученных характеристик скорости при использовании разных типов наблюдателей скорости.

**Ключевые слова:** электропривод, система управления, наблюдатели скорости, моталка, моделирование, Matlab, Simulink, асинхронный двигатель.

### ВВЕДЕНИЕ

Моталки получили широкое распространение на объектах металлургических предприятий, являясь составной частью прокатного стана. После заправки полосы металла в размотыватель, затем в клеть, а после нее в наматывающее устройство, осуществляется установка необходимой величины натяжения полосы и разгон рабочих валков размотывателя и наматывающего устройства в течение 10-15 с до установившейся скорости. Цикл работы двигателя моталки включает разгон, намотку полосы и торможение. Для обеспечения высокого качества полосы при разгоне, установившемся режиме и торможении необходимо поддерживать значение натяжения полосы постоянным [1-4]. В задачи механизма моталки входит сматывание полосы металла в рулоны. К системам управления данными механизмами предъявляются высокие требования как со стороны точности, надежности, так и по показателям быстродействия системы, так как от данных критериев зависит качество выпускаемой продукции.

В настоящее время наблюдается стремление к уменьшению габаритов и стоимости устройств за счет отказа от датчиков скорости. Альтернативой данного устройства становится наблюдатель состояния, для работы которого нет необходимости в установке дополнительного оборудования, данные системы действуют, используя известные параметры двигателя (ток и напряжение) [5-12]. Для исследования были вы-

браны следующие наблюдатели:

– наблюдатель Калмана – алгоритм, производящий идентификацию переменных состояния и параметров нелинейных динамических систем, осуществляет учет возникающих ошибок в системе, обеспечивает оптимальную оценку переменной состояния за счет учета значительного количества параметров двигателя. Одновременно из-за большого количества используемых данных наблюдатель сложен в настройке и неустойчив при отклонении параметров двигателя от номинальных значений;

– наблюдатели на базе адаптивной модели базируются на электромагнитных процессах, происходящих в двигателе. Адаптером осуществляется выработка сигнала адаптации контролируемой системы для приближения ее к параметрам эталонной модели [8]. В работе рассматриваются два вида наблюдателей – со сравнением потока и со сравнением ЭДС. Они обеспечивают высокую точность, содержат простой математический аппарат.

На объекте установлен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, управляемый частотным преобразователем. Используемая система управления – векторная. Данные системы управления получили широкое распространение за счет простоты реализации. Векторные системы работают с мгновенными значениями переменных [13, 14].

На основании расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя [15, 16] была построена математическая модель асинхронного двигателя в среде Matlab Simulink, удобная для анализа работы элек-

тропривода с различными наблюдателями скорости. При моделировании расчет параметров системы управления и двигателя осуществлялся с учетом параметров наиболее тяжелого режима работы.

РЕАЛИЗАЦИЯ В MATLAB SIMULINK НАБЛЮДАТЕЛЕЙ СКОРОСТИ

Среда математического моделирования Matlab Simulink дает возможность отследить происходящие в двигателе процессы без дополнительных финансовых затрат на исследование, позволяя производить корректировку необходимых параметров, добавление дополнительных блоков и систем, получать результаты.

За базовую модель при исследовании выбран неадаптивный наблюдатель скорости асинхронного двигателя, рассчитанный согласно [8] в неподвижной системе координат [15], математическая модель данного наблюдателя в среде Matlab приведена на рис. 1. Входными сигналами неадаптивного наблюдателя являются значения тока статора и напряжения статора в неподвижной системе координат x-y. На выходе наблюдателя формируется рассчитанная косвенным путем скорость. Принцип работы неадаптивного наблюдателя заключается в расчете неизвестных параметров по известным данным, базируясь на формулах, описывающих электромагнитные процессы в электродвигателе.

Неадаптивный наблюдатель наиболее точно осуществляет формирование скорости при моделировании полного цикла технологического процесса моталки, полученные данные сравнивались с результатами, снятыми при использовании датчика скорости (рис. 2). Присутствующие в графиках незначительные расхождения связаны с погрешностями, допущенными при расчете параметров схемы замещения.

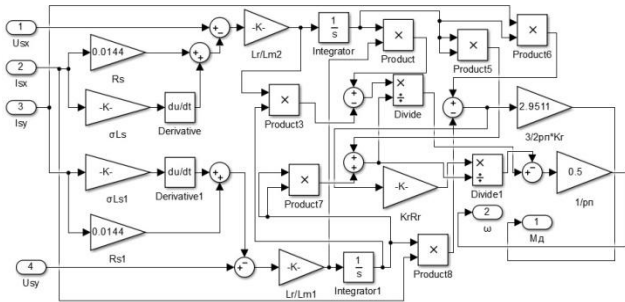


Рис. 1. Неадаптивный наблюдатель

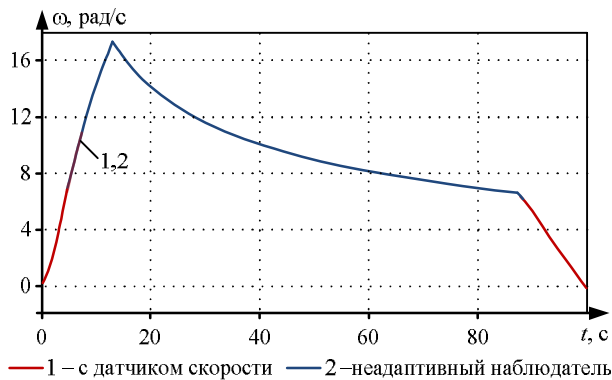


Рис. 2. Графики изменения скорости (полный цикл прокатки металла) при использовании неадаптивного наблюдателя и в системе с наличием датчика скорости

Модель фильтра Калмана в среде Matlab Simulink, структурная схема которого рассмотрена в [8], представлена на рис. 3. Фильтр Калмана имеет достаточно сложный математический аппарат, в основе лежат законы математической статистики.

Модель адаптивного наблюдателя на основании потокоцепления ротора в среде Matlab Simulink, структурная схема которого рассмотрена в [8], представлена на рис. 4. Потокоцепление ротора можно определить несколькими способами:

- по модели статора (рис. 5) – необходимыми данными для системы являются значения напряжения и тока статора;

- по модели ротора (рис. 6) – входными параметрами наблюдателя служат ток статора и скорость ротора.

В первом и во втором случае выходным параметром является значение потокоцепления.

Модель адаптивного наблюдателя со сравнением ЭДС отличается от модели адаптивного наблюдателя со сравнением потокоцепления тем, что интегрирующее звено в модели статора заменено на апериодическое звено. Коэффициент усиления наблюдателя со сравнением ЭДС имеет нелинейный характер, и по этой причине может принимать значение, близкое к нулю или ноль.

Адаптивный наблюдатель со сравнением ЭДС в среде Matlab Simulink, структурная схема которого рассмотрена в [8], представлена на рис. 7.

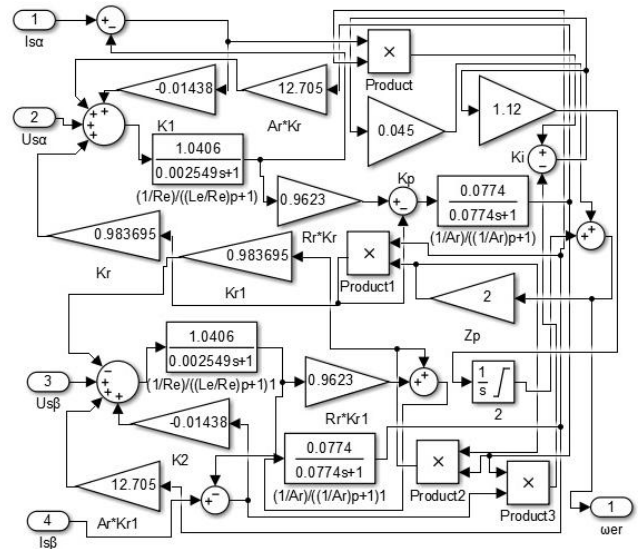


Рис. 3. Фильтр Калмана

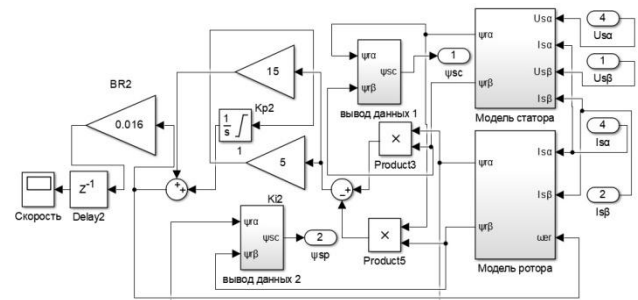


Рис.4. Адаптивный наблюдатель на основании потокоцепления ротора

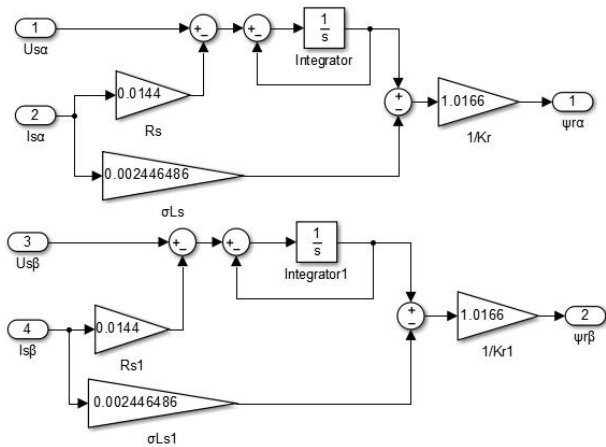


Рис. 5. Модель статора

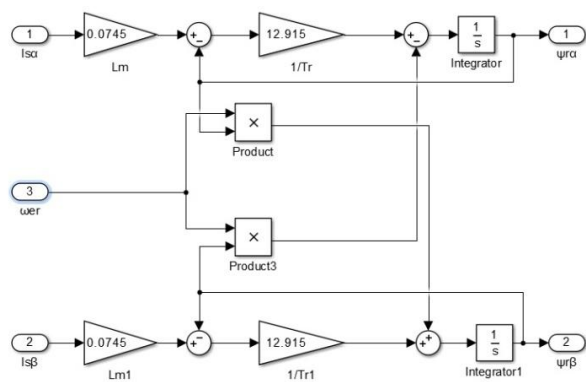


Рис. 6. Модель ротора

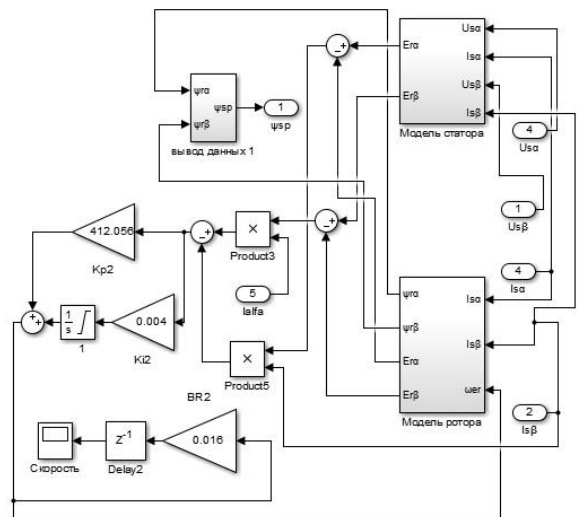


Рис. 7. Адаптивный наблюдатель скорости со сравнением ЭДС

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Совмещенные графики скорости при использовании наблюдателя Калмана и неадаптивного наблюдателя приведены на рис. 8.

Анализируя структуру графиков, можно сделать вывод, что отработка скорости происходит без присутствия погрешностей благодаря заложенному в данный тип алгоритму, позволяющему сводить рассогласование по параметрам к минимуму.

Данный тип наблюдателя подходит для использования на рассматриваемом объекте.

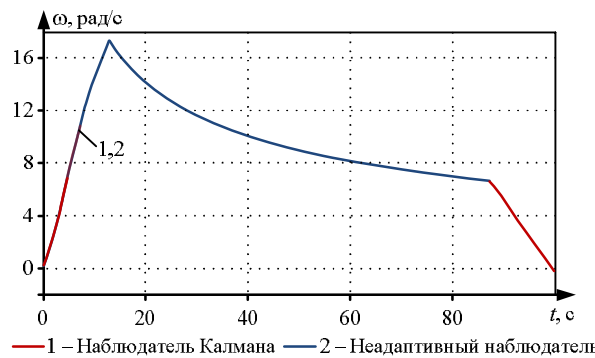


Рис. 8. Графики изменения скорости (полный цикл прокатки металла) при использовании неадаптивного наблюдателя и наблюдателя Калмана

Совмещенные характеристики скорости при использовании в системе управления асинхронным двигателем адаптивного наблюдателя на основании потокоцепления ротора и неадаптивного наблюдателя приведены на рис. 9.

Снижение скорости влечет за собой снижение напряжения, в связи с этим возникает значительная ошибка в определении скорости. В момент пуска наблюдается погрешность в районе шести процентов, а при замедлении механизма она достигает восемнадцати процентов. Присутствие двойного интегрирования в модели статора ведет к появлению значительных колебаний.

Использование данного типа наблюдателя не позволяет достичь необходимых показателей скорости во всем диапазоне технологического процесса привода моталки.

Анализ графика скорости системы с адаптивным наблюдателем со сравнением по ЭДС представлен на рис. 10.

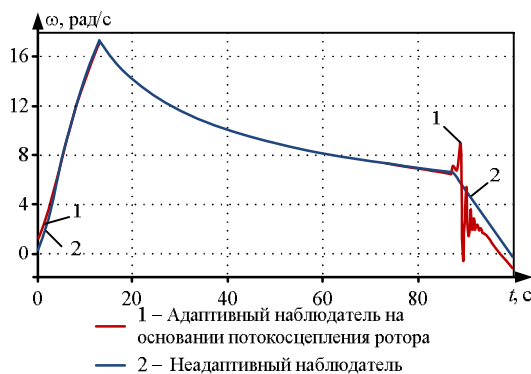


Рис. 9. Графики изменения скорости (полный цикл прокатки металла) при использовании неадаптивного наблюдателя и адаптивного наблюдателя на основании потокоцепления ротора

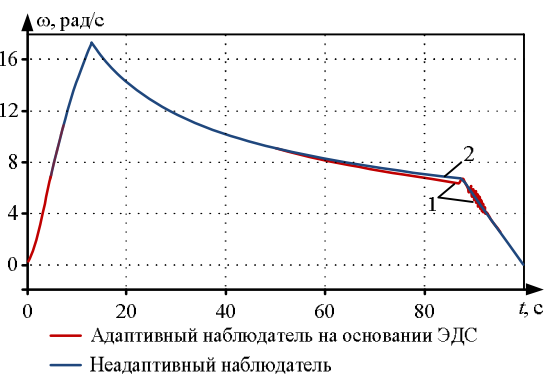


Рис. 10. Графики изменения скорости (полный цикл прокатки металла) при использовании неадаптивного наблюдателя и адаптивного наблюдателя со сравнением ЭДС

Анализ представленных результатов показывает хорошую робастность блока при пуске, снижение скорости сопровождается присутствием колебаний различного диапазона. Установившийся процесс демонстрирует постепенное нарастание ошибки до четырех процентов, что не является критичным для привода моталки.

Применение данного типа адаптивного наблюдателя нецелесообразно на рассматриваемом объекте.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы при номинальных параметрах системы:

1. Неадаптивный наблюдатель позволяет с высокой точностью отслеживать скорость.

2. Наблюдатель Калмана отображает данные по скорости с минимальным рассогласованием.

3. Адаптивный наблюдатель скорости со сравнением по потокоцеплению не обрабатывает технологический цикл при снижении скорости двигателя. Уменьшение скорости приводит к появлению колебаний.

4. Адаптивный наблюдатель скорости со сравнением по ЭДС при снижении скорости двигателя демонстрирует наличие погрешности и присутствие колебаний.

Дальнейшие исследования будут направлены на учет влияния изменения температуры двигателя в процессе его работы на сопротивления статора и, соответственно, анализ влияния изменения сопротивления статора на работу наблюдателей скорости.

*Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. М.: Высш. шк., 1979. 359 с.
- Фотиев М.М. Электрооборудование предприятий черной металлургии. М.: Металлургия, 1980. 312 с.
- Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. М.: Высш. шк., 1977. 391 с.
- Синюков А.В., Синюкова Т.В. Оптимизация системы регулирования натяжения в межклетевых промежутках стана холодной прокатки // XVI Всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов, Старый Оскол, 2019. С. 445-447.
- Синюкова Т.В., Синюков А.В. Неадаптивные наблюдатели в системах управления электроприводами // Управление большими системами: сб. тр. XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых: в 2-х т. Т. 2; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 10-13 сентября 2018 г. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2018. С. 103-109.
- Синюкова Т.В., Синюков А.В., Синюкова А.А. Применение адаптивных наблюдателей в системе управления электроприводом механизма передвижения // Управление большими системами: сб. тр. XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых: в 2-х т. Т. 2, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 10-13 сентября 2018 г. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2018. С. 110-115.
- Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural Network Speed Observers // 2019 1<sup>st</sup> International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk State Technical University, 2019.
- Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. Москва, 2015. 60 с.
- Доманов В.И., Доманов А.В., Биалова А.И. Синтез бездатчиковой системы управления асинхронным двигателем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2018. №7. С. 3-9.
- Даденков Д.А., Белоногов А.В., Варзаносов П.В. Бездатчиковое векторное управление с адаптивным наблюдателем скорости и непосредственной коррекцией электрического угла // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-3. С. 505-509.
- Мещеряков В.Н., Пикалов В.В., Бойков А.И. Исследование наблюдателя полного порядка для бездатчиковой системы электропривода // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2018. № 4 (54). С. 39-49.
- 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.
- Даденков Д.А., Солодкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 11. С. 117-128.
- Нгуен К.Т. Система бездатчикового векторного управления моментом и частотой вращения асинхронного двигателя // Электротехника. 2012. № 2. С. 11-15.
- Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. С.265.
- Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 256 с.

Поступила в редакцию 16 июня 2020 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### INVESTIGATION OF THE COILER DRIVE CONTROL SYSTEM WITH DIFFERENT TYPES OF SPEED OBSERVERS

Viktor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Drive, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mesherek@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>.

Tatyana V. Sinyukova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: Stw0411@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>.

Aleksey V. Sinyukov

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.  
E-mail: zeitsn@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6772-5370>.

Improvement of the existing facilities is an important topic for research. Mechanisms of metallurgical enterprises involved in a complex technological cycle often operate under conditions of increased vibrations and the presence of polluting components in the environment, these factors together negatively affect the measuring devices reducing the accuracy of their measurement. Switching to sensor-free control systems allows you to reduce the size of the device, get rid of measurement errors arising from the presence of connecting components between sensors and information processing devices. It also increases the system performance. All these indicators directly affect the quality of products. Parallelization of sensorless control systems is possible by introducing speed observers into the system, which use data obtained in the frequency converter for other purposes to obtain the necessary output parameters. Observers represent a mathematical structure that functions according to certain rules or algorithms. The paper considers several types of observers selected on the basis of a number of criteria, the main one being ease of implementation. The object in question uses an asynchronous motor with a short-circuited rotor, which is controlled by a frequency converter. In the Matlab mathematical modeling environment, the following were developed: a coiler drive control system, a non-adaptive observer, a Kalman observer (filter), an adaptive observer with flow coupling comparison, and an adaptive observer with EMF comparison. The system with a non-adaptive observer was taken as the reference model since the data of the transient process in speed coincided with the data obtained from the speed sensor with a minimum error. Comparison of the simulation results was carried out on the basis of the analysis of the error of the obtained speed characteristics when using different types of speed observers.

**Keywords:** electric drive, control system, speed monitors, coiler, Simulink simulation, Matlab, asynchronous motor.

#### REFERENCES

1. Kapuntsov Yu. D., Eliseev V.A., Ilyashenko L.A. *Elektrooborudovanie i elektroprivod promyshlennykh ustanovok* [Electrical equipment and electric drive of industrial installations]. Moscow: High school, 1979, 359 p. (In Russian)
2. Fotiev M.M. *Elektrooborudovanie predpriyatiy chernoy metallurgii* [Electrical equipment of ferrous metallurgy enterprises]. Moscow: Metallurgy, 1980. 312 p. (In Russian)
3. Bychkov V.P. *Elektroprivod i avtomatizatsiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Electric drive and automation of metallurgical production]. Moscow: High school, 1977, 391 p. (In Russian)
4. Sinyukov A.V., Sinyukova T.V. Optimization of the tension control system in the intercellular spaces of the cold rolling mill. *XVI Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov i aspirantov* [XVI all-Russian scientific and practical conference of students and postgraduate students], Stary Oskol, 2019, pp. 445-447. (In Russian)
5. Sinyukova T.V., Sinyukov A.V. Non-adaptive observers in electric drive control systems. *Upravlenie bolshimi sistemami: sbornik trudov XV Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Management of large systems: proceedings of the XV all-Russian school-conference of young scientists]: in 2 volumes, vol. 2. Voronezh state technical University, September 10-13, 2018. Voronezh: VSTU Publishing house, 2018, pp. 103-109. (In Russian)
6. Sinyukova T.V., Sinyukov A.V., Sinyukova A.A. Application of adaptive observers in the control system of the electric drive of the movement mechanism. *Upravlenie bolshimi sistemami: sbornik trudov XV Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Management of large systems: proceedings of the XV all-Russian school-conference of young scientists]: in 2 volumes, vol. 2. Voronezh state technical University, September 10-13, 2018. Voronezh: VSTU Publishing house, 2018, pp. 110-115. (In Russian)
7. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural network speed observers // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk State Technical University, 2019.
8. Kalachev Yu.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivode* [State observers in a vector electric drive]. Moscow, 2015. 60 p. (In Russian)
9. Domanov V.I., Domanov A.V., Bilalova A.I. Synthesis of sensorless induction motor control system. *Promyshlennye ASU i kontrolyery* [Industrial ACS and controllers]. 2018, no. 7, pp. 3-9. (In Russian)
10. Dadenkov D. A., Belonogov A.V., Varzanosov P.V. Non-static vector control with adaptive speed observation and direct correction of the electric angle. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2016, no. 11-3, pp. 505-509. (In Russian)
11. Meshcheryakov V.N., Pikalov V.V., Boikov A.I. Investigation of a full-order observer for a sensorless electric drive system. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernozemnyaya* [Proceedings of higher educational institutions of the Chernozem region], 2018, no. 4 (54), pp. 39-49. (In Russian)
12. Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I.Yu. Model of asynchronous motor for sensorless information and control systems of automated electric drive. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2016, no. 1 (113), pp. 111-120. (In Russian)
13. Dadenkov D.A., Solodkiy E.M., Shachkov A.M. Modeling of a vector control system for an asynchronous motor in the Matlab/Simulink package. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, management systems], 2018, no. 11, Pp. 117-128. (In Russian)
14. Nguyen K.T. Sensorless vector control system for torque and speed of induction motor. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2012, no. 2, pp. 11-15. (In Russian)
15. Sokolovsky G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC-Drives with frequency regulation]. Moscow: Academy, 2006. 265 p. (In Russian)
16. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energosberegayushchiy asinkhronnyi elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Moscow: Academy, 2004. 256 p. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В., Синюков А.В. Исследование системы управления приводом моталки с разными типами наблюдателей скорости // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3(48). С. 28-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-28-32)

Meshcheryakov V.N., Sinyukova T.V., Sinyukov A.V. Investigation of the Coiler Drive Control System with Different Types of Speed Observers. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 28-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-28-32)