

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.313.334

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-4-8](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-4-8)

Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С.

Липецкий государственный технический университет

## СИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В конце прошлого века среди регулируемых приводов переменного тока наибольшее распространение получили асинхронные двигатели с фазным ротором. Они устанавливались на конвейеры, транспортеры, краны. Это было обусловлено относительной простотой регулирования частоты вращения двигателя посредством воздействия на роторную цепь. Внедрение частотно-способа регулирования в таких приводах в наше время осложняется тем, что большинство преобразователей частоты рассчитаны на применение в приводах, в составе которых установлен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Замыкание фазной обмотки накоротко приводит к значительному увеличению потерь в процессе разгона и регулирования скорости вращения двигателя. Если обмотку статора асинхронного двигателя с фазным ротором подключить к преобразователю частоты, а обмотку ротора к звену постоянного тока этого преобразователя, двигатель будет обладать свойствами синхронного. Электропривод получает возможность работы в широком диапазоне, а характеристики двигателя абсолютно жесткие. Реализация подобного способа управления представлена в данной статье. Работа системы управления исследована с помощью моделирования в программном пакете Matlab Simulink. Дана характеристика полученным результатам.

**Ключевые слова:** синхронизированный асинхронный привод, асинхронный двигатель с фазным ротором, регулируемый электропривод, двигатель, неуправляемый выпрямитель, автономный инвертор тока, система управления, устойчивость, релейный регулятор тока, математическая модель, Matlab Simulink.

## ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд производственных механизмов, которые требуют от систем управления получения абсолютно жестких рабочих характеристик и широкий диапазон регулирования скорости. В таких механизмах целесообразно использовать синхронизированный электропривод, выполненный на базе асинхронного двигателя с фазным ротором [1,2]. Асинхронный двигатель с фазным ротором переводится в синхронный режим подачей постоянного тока в обмотку ротора [3].

Поскольку по обмоткам ротора двигателя протекает постоянный ток и скорость вращения ротора двигателя не зависит от нагрузки на валу, что характерно для синхронной машины, асинхронный двигатель с фазным ротором, работающий в таком режиме, называют синхронизированным [3].

Одним из преимуществ синхронного режима двигателя перед асинхронным режимом заключается в способности двигателя изменять величину и знак реактивной мощности при регулировании величины тока возбуждения [4]. При прямом подключении обмотки статора к питающей сети в случае перевозбуждения двигателя реактивная мощность отдается в питающую сеть, а при недовозбуждении потребляется из сети, поэтому имеется принципиальная возможность воздействия на процесс обмена энергией между двигателем и системой электроснабжения путем регулирования тока возбуждения мощных синхронизированных асинхронных двигателей [5]. Целью работы является синтез системы управления синхронизированным асинхронным электроприводом.

## МЕТОДЫ

Схема подключения синхронизированного двигателя представлена на **рис. 1**. Обмотка ротора подключается к источнику постоянного напряжения в соответствии со схемой, изображенной на рисунке. Диоды

в схеме используются для исключения возникновения свободных токов в замкнутом контуре, образованном двумя параллельно соединенными обмотками ротора. Двигатель после окончания электромеханического переходного процесса, связанного с пуском электропривода и втягиванием двигателя в синхронизм, продолжает работать в статическом режиме, обладая всеми свойствами синхронного неявнополюсного двигателя классического типа.

Асинхронный двигатель с фазным ротором, работающий в синхронном режиме, для обеспечения устойчивой работы в режиме пуска, осуществляемого с помощью задатчика интенсивности, требует точного задания темпа разгона с его коррекцией при изменении момента инерции механизма. Поэтому в системе автоматического управления синхронизированным электроприводом, построенным на базе инвертора тока, для повышения устойчивости введен дополнительный внутренний контур регулирования тока статора, подключенный контуру регулирования скорости двигателя. Внутренние контуры регулирования фазных токов статора построены на базе релейного регулятора тока.

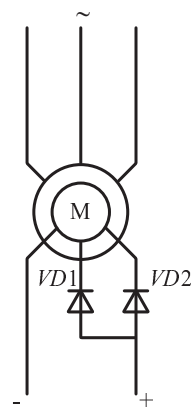


Рис. 1. Схема подключения синхронизированного асинхронного двигателя

Структурная схема частотного синхронизированного асинхронного электропривода приведена на **рис. 2**. В системе частотно-регулируемого синхронизированного асинхронного электропривода используется стандартный преобразователь, который питает обмотку статора. Он содержит неуправляемый выпрямитель, выход которого соединён с входом управляемого автономного инвертора. Электромагнитное поле, создаваемое обмоткой статора, определяется выходными параметрами частотного преобразователя: током  $I_l$  и частотой  $f_l$ . Устройство содержит выпрямитель 1 и инвертор 2, электродвигатель 3. Инвертор выполнен на полностью управляемых вентилях – IGBT-транзисторах. На валу двигателя установлен датчик скорости 5, с помощью датчиков 4 в систему управления 6 поступают сигналы напряжений и токов. Структурная схема блока управления, реализованная в программном пакете Matlab Simulink, представлена на **рис. 3**.

В режиме пуска частота тока статора формируется с помощью задатчика интенсивности [6]. В момент достижения заданной частоты тока статора система управления переходит в режим работы на требуемой скорости. Регулятор тока работает по принципу релейного управления. В результате сравнения на выходах сумматоров получаем разницу между заданным и действительным значениями тока в фазах [7]:

$$\begin{cases} \Delta i_{1A} = i_{1A}^* - i_{1A} \\ \Delta i_{1B} = i_{1B}^* - i_{1B} \\ \Delta i_{1C} = i_{1C}^* - i_{1C}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $i_{1A}^*, i_{1B}^*, i_{1C}^*$  – заданные значения фазных токов статора;  $i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}$  – действующие значения фазных токов.

Полученные сигналы поступают на входы блоков гистерезиса работающих по следующему алгоритму:

$$\begin{cases} \text{если } \Delta i_i \leq \tau / 2, \text{ то на выходе (0);} \\ \text{если } \Delta i_i > \tau / 2, \text{ то на выходе (1),} \end{cases} \quad (2)$$

где  $\tau$  – модуль гистерезиса, задаваемый из условия точности поддержания тока статора и устойчивости работы системы регулирования.

Обычно выбирается

$$\tau = \frac{\sqrt{2} I_{1H}}{100}, \quad (3)$$

где  $I_{1H}$  – действующее значение номинального тока статора.

Далее сигнал с выхода блоков гистерезиса поступает на выход управления транзисторами соответствующей фазы. Частота переключений силовых транзисторов может составлять 10 кГц.

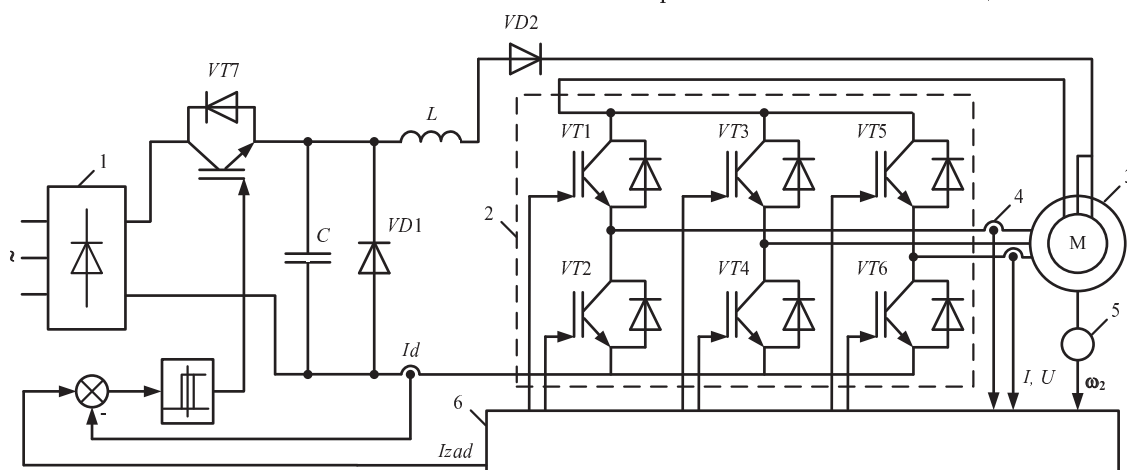


Рис. 2. Схема подключения синхронизированного асинхронного двигателя

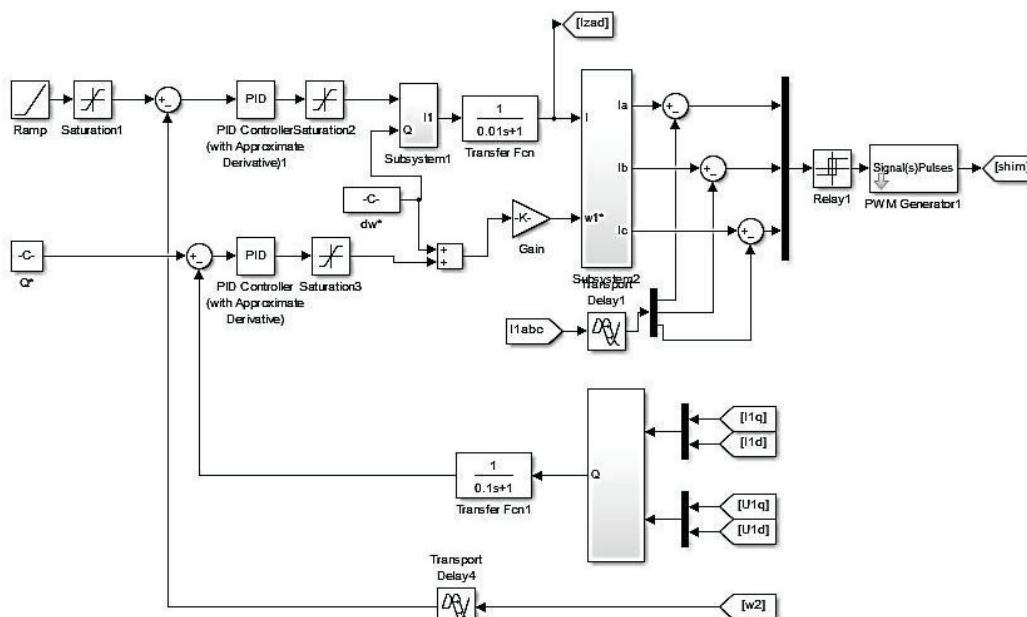


Рис. 3. Схема блока управления

Для синхронного режима асинхронного двигателя важным параметром является угол нагрузки [4].

$$\theta_{эл} = \int \omega_1 dt - \int \omega_{эл} dt, \quad (4)$$

где  $\omega_1$  – круговая частота напряжения статора;  $\omega_{эл} = \omega p_n$ ;  $\omega$  частота вращения ротора;  $p_n$  – число пар полюсов двигателя.

Для снижения колебаний ротора, возникающих в процессе пуска двигателя, в системе управления работает контур регулирования угла нагрузки  $\theta$ , который производит коррекцию сигнала задания частоты тока статора.

Настройка контура регулирования угла нагрузки произведена с учетом следующих особенностей:

– амплитуда колебаний угла нагрузки зависит как от электрических, так и от механических параметров двигателя;

– статическая нагрузка на валу привода определяется средней за период свободных колебаний величины угла нагрузки;

– для гашения колебаний, возникающих в приводе, согласно классической механики, необходимо управляющее воздействие прикладывать в одной фазе с колебаниями системы.

Корректирующий коэффициент  $k$  выбран исходя из необходимости быстроты регулирования угла нагрузки. Для того чтобы система была устойчивой, коэффициент задается меньше единицы, но, увеличивая его, повышается быстродействие контура регулирования угла нагрузки. Исходя из этого, целесообразно определять  $k$  самостоятельно для каждого отдельного электропривода. Постоянная времени определяется частотой свободных колебаний системы электропривода, она не должна быть меньше этой частоты. Чрезмерное же увеличение ее приводит к ухудшению динамических

характеристик системы при изменении нагрузки на валу. Таким образом, постоянно времени рекомендуется выбирать в пределе

$$(1 \div 2) T_0, \quad (5)$$

где  $T_0$  – период свободных колебаний разомкнутой системы электропривода.

Скорректированные сигналы задания тока, получаемые на выходе блока задания фазных токов, определяются по формулам:

$$\begin{aligned} I_a^* &= I_m \sin(\omega t + \varphi_0); \\ I_b^* &= I_m \sin(\omega t + 120^\circ + \varphi_0); \\ I_c^* &= I_m \sin(\omega t + 240^\circ + \varphi_0), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varphi_0$  – сигнал коррекции.

В режиме пуска темп изменения сигнала задания частоты задается задатчиком интенсивности, настроенным исходя из величины суммарного момента инерции электропривода и требуемого ускорения. Если выбранный темп разгона несколько завышен и ротор двигателя не успевает изменить свою скорость с заданным темпом, сигнал  $\varphi_0$  корректирует темп разгона и частоту тока статора.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложенная система управления была смоделирована в программной среде Matlab Simulink [8-10] (рис. 4).

Результаты моделирования представлены на рис. 5. На нем изображены угловая скорость (а), момент (б), угол нагрузки (в), ток статора (г), а также механическая характеристика асинхронного двигателя в процессе пуска и наброса нагрузки (д).

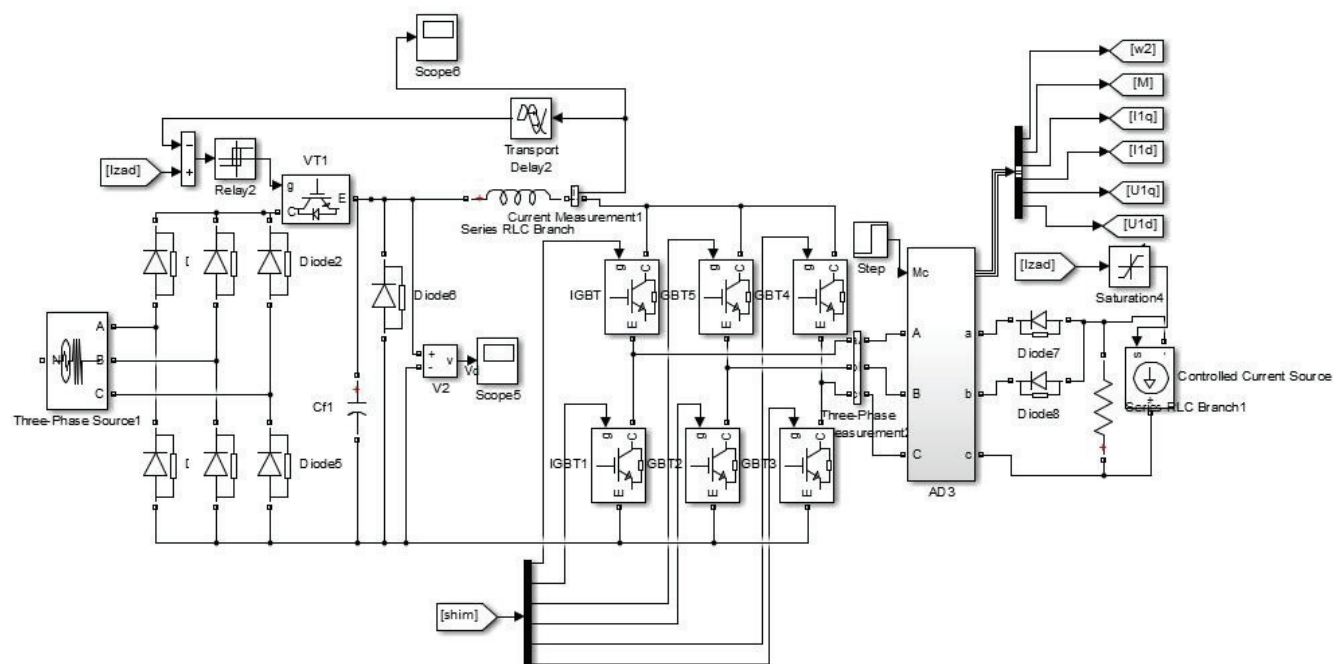


Рис. 4. Модель синхронизированного асинхронного электропривода

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработана и смоделирована система управления синхронизированным асинхронным электроприводом. Поскольку на устойчивость рассматриваемого электропривода большое влияние оказывает величина угла нагрузки, в системе управления была осуществлена коррекция мгновенного задания на скорость с целью поддержания в пусковом режиме постоянной величины этого угла. Введенная в скалярную систему управления векторная коррекция переменных позволяет в любой момент времени ориентировать вектор тока статора относительно вектора потокосцепления ротора. Таким образом, в системе управления синхронизированного частотного электропривода обеспечена стабилизация пускового момента. Это позволяет использовать данный ЭП на механизмах с циклическим режимом работы.

*Статья написана при поддержке гранта РФФИ №17-48-480492 «Анализ, математическое моделирование и оптимизация управления электромеханическими системами с электроприводами переменного тока мехатронных устройств, манипуляторов и грузоподъемных механизмов».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мещеряков В.Н. Системы регулируемого асинхронного электропривода для подъемно-транспортных механизмов: монография. Липецк: ЛГТУ, 2005. 112 с.
2. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Академия, 2006. 272 с.
3. Мещеряков В.Н., Соломатин П.Н. Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. № 2. С. 51-57.
4. Белов М.П., Новиков А.Д., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М.: Академия, 2007. 576 с.
5. Мещеряков В.Н., Башлыков А.М., Мещерякова О.В. Система скалярного частотного управления синхронизированной асинхронной машиной с питанием обмоток статора и ротора от автономного инвертора тока // Современные сложные системы управления X HTCS'2012: материалы Международной научно-технической конференции. Старый Оскол: ТНТ, 2012. С. 50-52.
6. Мещеряков В.Н., Карантаев В.Г. Применение беспонсковой адаптивной системы для управления ЭП с вентильным двигателем // Электротехнические комплексы и системы. 2006. №2. С. 38-40.
7. Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Частотный асинхронный электропривод с коррекцией фазового сдвига между моментобразующими векторами // Системы управления и информационные технологии. 2017. №2 (68). С. 48-57.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. СПб.: Питер, 2008. 288 с.
9. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА, 2008. 368 с.
10. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. М.: МИ, 2015. 373 с.

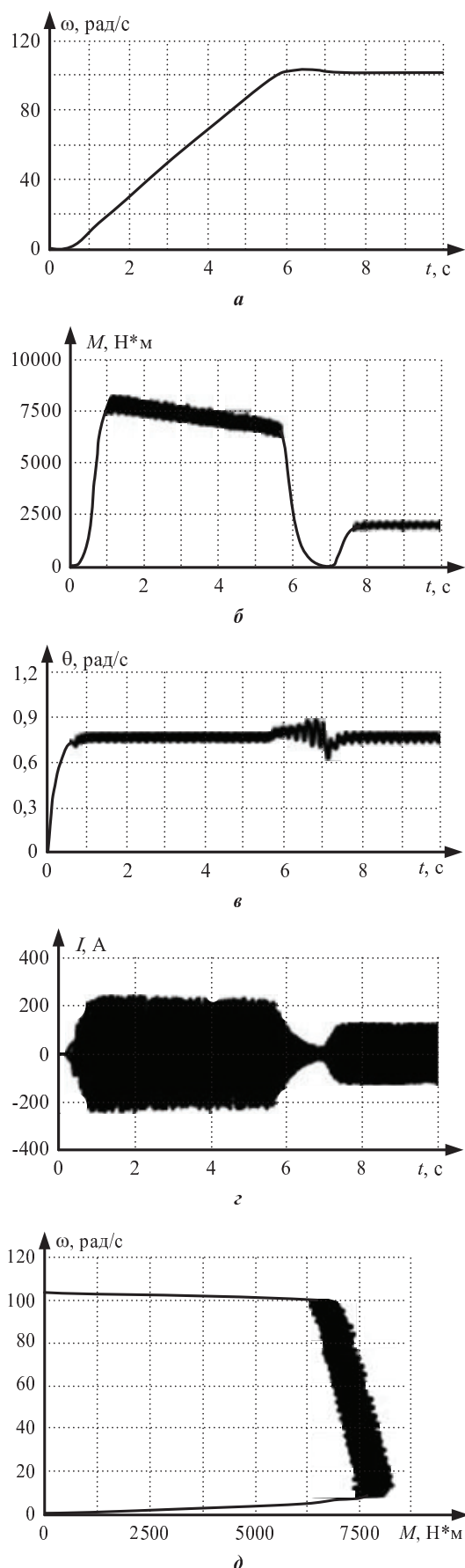


Рис. 5. Результаты моделирования синхронизированного асинхронного электропривода

Поступила в редакцию 01 декабря 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SYNCHRONIZED ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE WITH VARIABLE-FREQUENCY CONTROL

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of electric drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

Dmitriy S. Sibirtsev

Postgraduate Student, the Department of electric drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.

At the end of the last century among alternating-current adjustable drives the greatest distribution was gained by induction motors with a phase rotor. They were established on conveyors and cranes. It was caused by the relative simplicity of regulation of a rotation frequency of the engine by means of impact on a rotor chain. Application of a certain way of regulation in such drives is complicated presently by the fact that the majority of frequency transformers are intended for application in drives as a part of which the induction motor with a short-circuited rotor is established. Short circuit of a phase winding leads briefly to the significant increase in losses in the course of dispersal and speed control of rotation of the engine. If you connect a winding of a casing of an induction motor with a phase rotor to a frequency transformer, and a rotor winding to a link of a direct current of this converter, the engine will have properties of synchronous one. The electric drive gets an opportunity to be used widely, and characteristics of the engine are absolutely constant. Realization of a similar way of management is considered in this article. The work of the control system is investigated by means of model operation in a software package of Matlab Simulink. The characteristic is given to the received results.

**Keywords:** Synchronized asynchronous electric drive, slipping induction motor, variable-speed drive, motor, uncontrolled rectifier, self-excited current inverter, control system, control stability, relay current regulator, mathematical model, Matlab Simulink

REFERENCES

1. Meshcheryakov V.N. *Sistemy reguliruemogo asinkhronnogo elektropriroda dlya pod'emno-transportnykh mekhanizmov* [Systems of the adjustable asynchronous electric drive for hoisting-and-transport mechanisms]. Lipetsk: LGTU Publ., 2005. 112 p. (In Russian)
2. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym upravleniem* [Alternating-current electric drives with variable-frequency control]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
3. Meshcheryakov V.N., Solomatina P.N. Synchronized induction electric drive with variable-frequency control. *Izvestiya*

- vuzov. Elektromekhanika*. [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2009, no. 2, pp. 51-57. (In Russian)
4. Belov M.P., Novikov A.D., Rassudov L.N. *Avtomatizirovanny elektroprihod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov* [Automated electric drive of standard production mechanisms and technological complexes]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 576 p. (In Russian)
5. Meshcheryakov V.N., Bashlykov A.M., Meshcheryakova O.V. The system of scalar frequencies control of the synchronized asynchronous motor with a power supply of windings of a casing and a rotor from the independent inverter of current. *Sovremennye slozhnye sistemy upravleniya X HTCS'2012: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [Modern complex control systems X HTCS'2012: materials of the International scientific and technical conference]. Staryy Oskol, 2012, pp. 50-52. (In Russian)
6. Meshcheryakov V.N., Karantaev V.G. Application of a searchless adaptive system for control of the drive with the barrier-layer engine. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2006, no. 2, pp. 38-40. (In Russian)
7. Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. The frequency-controlled electric drive with correction of phase shift between torque-producing vectors. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. [Control systems and information technology]. 2017, no. 2 (68), pp. 48-57. (In Russian)
8. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Model operation of electrotechnical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. St. Petersburg, Piter Publ., 2008, 288 p. (In Russian)
9. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PC* [Projection the mekhatronnykh of systems on the personal computer] St. Petersburg, KORONA Publ., 2008. 368 p. (In Russian)
10. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprihodov* [Control systems of electric drives]. Moscow, MI Publ., 2015, 373 p. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Сибирцев Д.С. Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 1(38). С. 4-8. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-4-8](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-4-8)

Meshcheryakov V.N., Sibirtsev D.S. Synchronized Asynchronous Electric Drive with Variable-Frequency Control. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 4-8. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1\(38\)-4-8](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-1(38)-4-8)