

УДК 62-559.3; 62-523.2

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.31.4.008](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.31.4.008)

Оптимизация статических режимов работы тягового асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением

О.В. Ермилина, А.Д. Семенов

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет»,
Пенза, Российская Федерация*

Резюме: Для повышения энергетических показателей предлагается режим работы асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением, работающем при критическом скольжении на вентиляторную нагрузку. Предлагается структура асинхронного электропривода постоянной мощности с частотно-токовым управлением, работающем при критическом скольжении. Теоретически рабочая точка электропривода, в которой скольжение равно больше или равно критическому будет точкой неустойчивого равновесия. В разомкнутой системе регулирования координат электропривода обеспечить его устойчивую работу на критическом скольжении невозможно из-за неконтролируемых возмущений. Поэтому было предложено использовать замкнутую систему управления с подчинённым регулированием основных координат. В качестве таких координат были выбраны ток статора и частота вращения. Особенность данной структуры является алгоритм управления преобразователем частоты, заключающийся в том, что напряжение вычисляется системой подчинённого регулирования координат из условия поддержания постоянной мощности. Была разработана модель такого электропривода в Simulink и проведено моделирование его работы. Предлагаемое решение асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением обеспечивает устойчивую работу при критическом скольжении и при этом достигается минимальное потребление тока статора. Поскольку параметры асинхронного электродвигателя непостоянны и могут меняться в процессе эксплуатации, то для вычисления необходимой добавки скорости целесообразно использовать экстремальное регулирование этой добавки добиваясь такого её значения при котором обеспечивается минимум потребляемого тока.

Ключевые слова: тяговый электропривод, асинхронный электродвигатель, критическое скольжение, устойчивость, ток статора.

Для цитирования: Ермилина О.В., Семенов А.Д. Оптимизация статических режимов работы тягового асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2020;8(4). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=854> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.008.

Optimization of static modes traction asynchronous electric drive with frequency-current control

O.V. Ermilina, A.D. Semenov

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Penza State University», Penza, Russian Federation*

Abstract: To increase the energy performance an asynchronous electric drive operating mode with frequency-current control is proposed operating at a critical slip on the fan load. The structure of asynchronous electric drive of constant power with frequency-current control is proposed operating at critical slip. Theoretically the operating point of the electric drive in which the slip is equal to or equal

to the critical one will be a point of unstable equilibrium. In an open-loop control system of the coordinates of an electric drive, it is impossible to ensure its stable operation on a critical slip due to uncontrolled disturbances. Therefore, it was proposed to use a closed-loop control system with subordinate regulation of the main coordinates. The stator current and rotation frequency were chosen as such coordinates. The peculiarity of this structure is the control algorithm of the frequency converter, which consists in the fact that the voltage is calculated by the subordinate coordinate control system from the condition of maintaining constant power. A model of such an electric drive was developed in Simulink and its operation was simulated. The proposed solution of an asynchronous electric drive with frequency-current control ensures stable operation at critical slip and at the same time minimizes the stator current consumption. Since the parameters of an asynchronous electric motor are not constant and can change during operation, then to calculate the required speed addition, it is advisable to use extreme regulation of this additive, achieving such a value at which the minimum current consumption is ensured.

Keywords: electric traction, induction motor, a critical slip resistance, stability, stator current.

For citation: Ermilina O.V., Semenov A.D. Optimization of static modes traction asynchronous electric drive with frequency-current control. *Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=854> DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.008 (In Russ).

Введение

Тяговый электропривод с асинхронными двигателями благодаря более высокой надёжности, простоте обслуживания и относительно низкой стоимости находит всё больше широкое применение в различных транспортных средствах.

Частотно-токовое регулирование асинхронного электропривода в силу особенностей его работы [1-8], находит широкое применение в электроприводах с повышенной перегрузочной способностью. При таком регулировании возможно оптимальное использование электродвигателей для получения как максимального момента на валу при заданном токе, так и минимальных потерь [9]. В работах кафедры ЭАПУ УГТУ-УПИ [11, 12] в области частотно-регулируемых асинхронных электроприводов доказывается что асинхронный электропривод при питании от преобразователя частоты с автономными инверторами напряжения и тока, а также от преобразователя с непосредственной связью обладает экстремальными характеристиками по многим наиболее важным показателям качества. При таком регулировании возможно оптимальное использование электродвигателей для получения как максимального момента на валу при заданном токе, так и высоких энергетических показателей [13].

Рабочие режимы для асинхронного электропривода

Для доказательства этого утверждения проанализируем уравнение механической характеристики асинхронного электродвигателя при частотно-токовом управлении [1]

$$M = \frac{mI_1^2 L_m^2}{s_k + \frac{s}{s_k}}, \quad (1)$$

где m - число фаз, I_1 - фазный ток, s – скольжение, s_k - критическое скольжение, R_2 – активное сопротивление ротора, ω_1 - частота тока статора, L_m, L_2 – индуктивности намагничивающего контура и ротора соответственно. Критическое скольжение равно

$$s_k = \frac{R_2}{\omega_1 L_2}, \quad (2)$$

где R_2 – активное сопротивление ротора, ω_1 - частота питающего напряжения.

Очевидно, что при частотно-токовом управлении ток статора постоянен $I_1 = const$ и максимум момента электродвигателя будет достигаться при условии $s = s_k$.

При этом отношение $\frac{M}{I_1^2}$ будет максимальным, что особенно важно для тягового электропривода, поскольку заданный тяговый момент обеспечивается при минимально возможном токе статора.

На Рисунке 1 приведены расчётные механические характеристики асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением работающем при критическом скольжении на вентиляторную нагрузку.

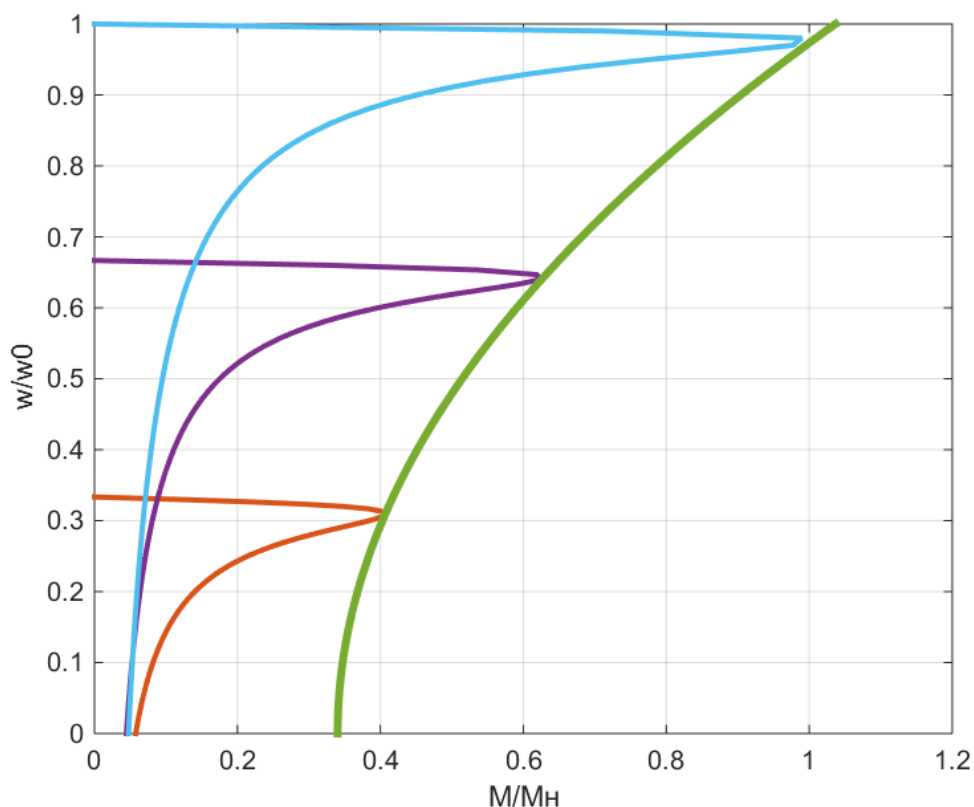


Рисунок 1 – Механические характеристики асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением работающем при критическом скольжении на вентиляторную нагрузку

Figure 1 - Mechanical characteristics of an asynchronous electric drive with frequency-current control operating at a critical slip on a fan load

Теоретически рабочая точка электропривода, в которой скольжение равно критическому будет точкой устойчивого равновесия. Вторая точка, в которой момент электродвигателя также равен моменту сопротивления будет точкой неустойчивого равновесия. На Рисунке 2 показан данный случай.

Для того чтобы обеспечить работу электропривода со скольжением равным критическому частоту питающего напряжения следует выбирать из условия

$$\omega_0 = \omega + \omega_0 s_k$$

подставляя сюда выражение (2) для s_k получим

$$\omega_0 = \omega + \frac{R_2}{L_{20}} \cdot \quad (3)$$

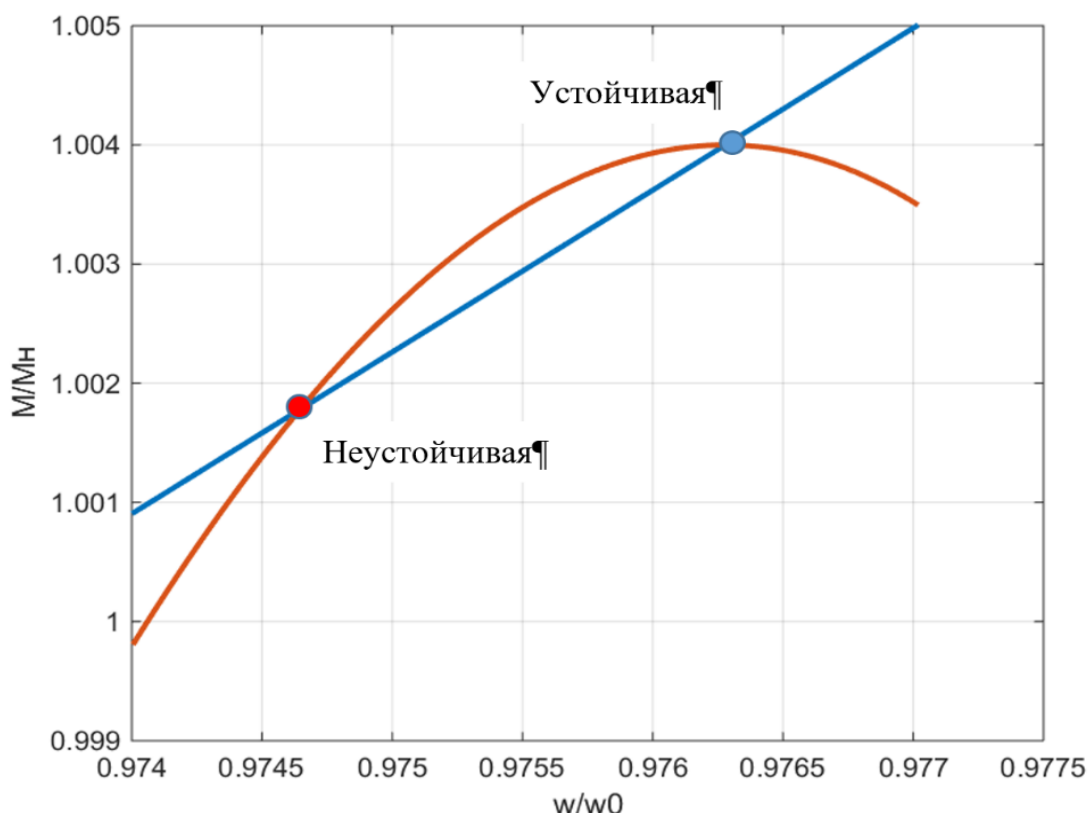


Рисунок 2 – Рабочие точки электропривода при работе с $s = s_k$
 Figure 2 - Operating points of the electric drive when working with $s = s_k$

Моделирование асинхронного электропривода постоянной мощности с частотно-токовым управлением

В разомкнутой системе регулирования координат электропривода обеспечить его устойчивую работу на критическом скольжении по условию (3) невозможно из-за неконтролируемых возмущений. Поэтому было предложено использовать замкнутую систему управления с подчинённым регулированием основных координат. В качестве таких координат были выбраны ток статора I_1 , частота вращения ротора ω и потребляемая мощность P . Схема такой системы регулирования показана на Рисунке 3.

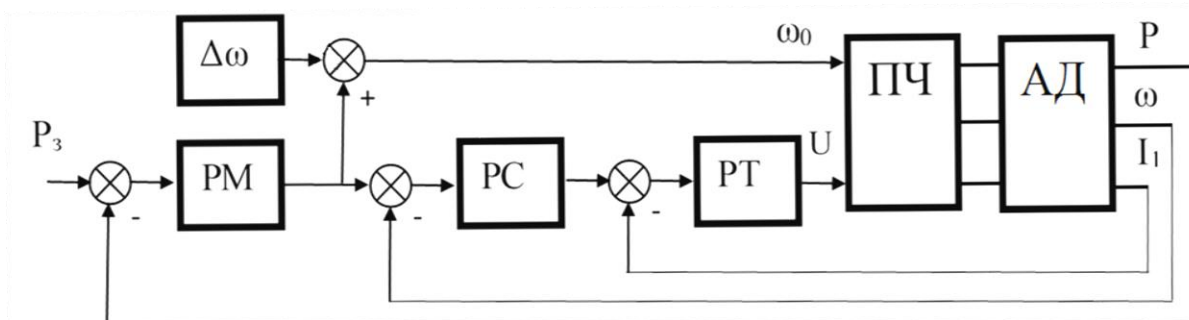


Рисунок 3 Схема асинхронного электропривода постоянной мощности с частотно-токовым управлением, работающем при критическом скольжении
 Figure 3 – Scheme of an asynchronous electric drive of constant power with frequency-current control, operating at critical slip

На схеме приняты следующие обозначения. P_3 – заданное значение мощности электропривода, РМ, РС, РТ – регуляторы мощности, скорости и тока соответственно, U и ω_0 – напряжение и частота питающего напряжения, ПЧ, АД – преобразователь частоты и асинхронный двигатель.

Особенность данной структуры является новый алгоритм управления преобразователем частоты заключающийся в том, что напряжение ПЧ вычисляется системой подчинённого регулирования координат из условия поддержания постоянной мощности, а частота питающего напряжения. вычисляется из выражения (3).

Была разработана модель такого электропривода в Simulink и проедено моделирование его работы. Модель асинхронного двигателя с учётом общепринятых допущений представлена в виде модели идеализированного двухфазного электромеханического преобразователя, который в специальной литературе [2] получил название обобщенной электрической машины.

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_1}{dt} &= U_1 - R_1 I_1 - j\omega_k \Psi_1; \\ \frac{d\Psi_2}{dt} &= U_2 - R_2 I_2 - j(\omega_k - \omega) \Psi_2; \\ M &= p_n L_m (I_1 \times I_2). \end{aligned} \quad (4)$$

Вектор потокосцепления статора Ψ_1 и ротора Ψ_2 соответственно равны:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= L_1 I_1 + L_m I_2; \\ \Psi_2 &= L_m I_1 + L_2 I_2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $L_1; L_2; L_m$ - индуктивности статора, ротора и намагничивающего контура соответственно; R_1, R_2 - активные сопротивления статора и ротора ; U_1, U_2 - векторы напряжений статора и ротора; I_1, I_2 - векторы токов статора и ротора; ω_k, ω - частота вращения системы координат относительно статора и частота вращения ротора; M - электромагнитный момент, развиваемый двигателем; p_n - число пар полюсов, $j = \sqrt{-1}$. Моделировался электропривод с асинхронным двигателем АИР112МА8. Характеристики электродвигателя приведены в таблице 1. В таблице 2 представлены параметры схемы замещения, полученные из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Table 1 - Characteristics of the AIR112MA8 electric motor

Таблица 1 – Характеристики электродвигателя АИР112МА8

Тип электродвигателя	Мощность	Синхронная частота вращения	Ток статора	КПД, %	Кэф. мощности	Ипуск./Ином.	Масса, (IM1081)
	кВт	об. /мин.	А	%	-	-	кг
АИР90L4	2,2	1500	5	81	0,83	6,5	15,0/15,1

Table 2 - Parameters of the equivalent circuit of the AIR112MA8 electric motor

Таблица 2 – Параметры схемы замещения электродвигателя АИР112МА8

Активное сопротивление статора	Активное сопротивление ротора	Индуктивность статора	Индуктивность ротора	Индуктивность намагничивающего контура	Приведённый момент инерции
Ом	Ом	мГн	мГн	мГн	кгм ²
2,47	2,69	5,7	16	3623143	0,02

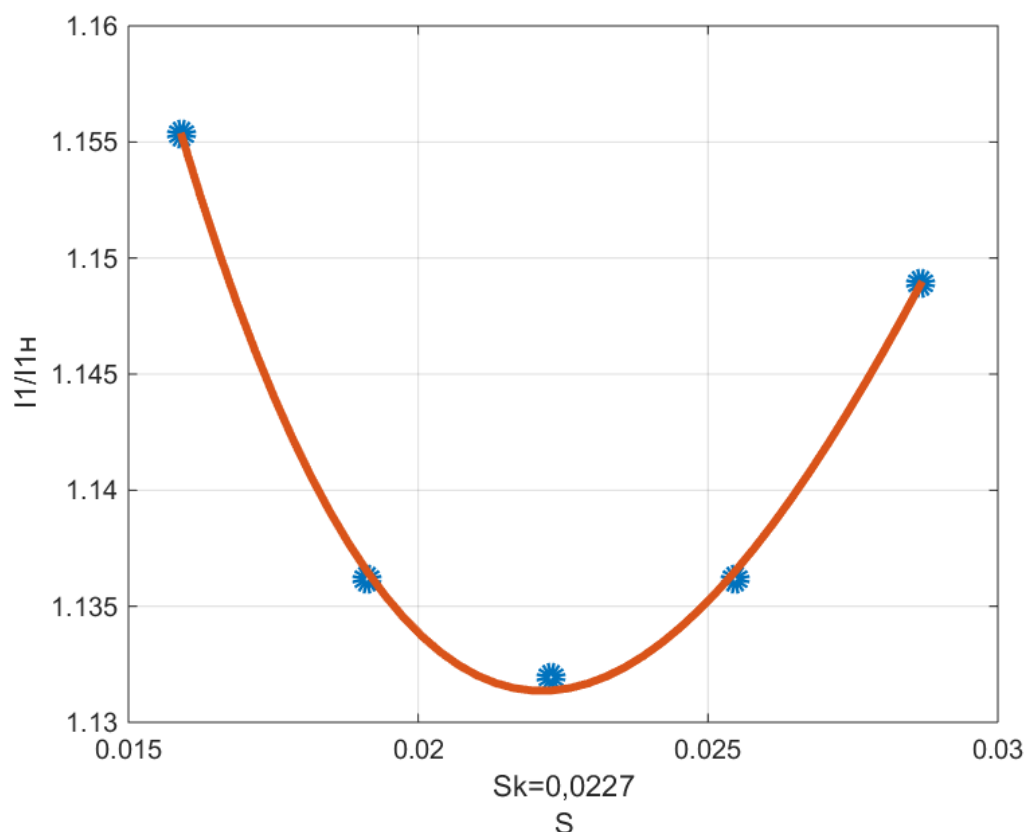


Рисунок 6 – Зависимость тока статора от скольжения
Figure 6 - Dependence of stator current on slip

Заклучение

Из графика, представленного на Рисунке 6 видно, что предлагаемая структурная схема асинхронного электропривода с частотно-токовым управлением (Рисунок 2) обеспечивает устойчивую работу при критическом скольжении и при этом достигается минимальное потребление тока статора.

Поскольку параметры асинхронного электродвигателя непостоянны и могут меняться в процессе эксплуатации, то для вычисления необходимой добавки скорости $\Delta\omega$ целесообразно использовать экстремальное регулирование этой добавки добиваясь такого её значения при котором обеспечивается минимум потребляемого тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Усольцев А.А. *Частотное управление асинхронными двигателями*. 2006:45-46.
2. Kodkin V. L., Anikin A. S., Baldenkov A. A. Experimental research of asynchronous electric drive with positive dynamic feedback on stator current. *Industrial Engineering Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2017 International Conference*. 2017. DOI 10.1109/SIBCON.2015.7146978.
3. Diyoke G. C., Okeke C., Uchechi Aniagwu. Different Methods of Speed Control of Three-Phase Asynchronous Motor. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2016;4(2):62-68.

4. Поляков В.Н. Оптимизация установившихся режимов асинхронизированной машины. *Электротехнические системы и комплексы: межвузовский сборник науч. под ред. С.И. Лукьянова*. Магнитогорск: МГТУ, 2006;12:130-138.
5. Ключев В.И. *Теория электропривода*. 2001;195-200.
6. Мищенко В.А. Векторная теория асинхронного двигателя. *Электротехника*. 2007;6:5-12.
7. Соколовский Г.Г. *Электроприводы переменного тока с частотным регулированием*. 2006.
8. Ключев В.И., Терехов В.М. *Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов*. 1980.
9. Поляков В.Н. Оптимизация установившихся режимов двигателей переменного тока с фазным ротором. *Электроприводы переменного тока: тр. Международной четырнадцатой науч.-техн. Конф.* 2007;161-164.
10. Андрианов М. В., Родионов Р.В. Особенности электропотребления комплектных приводов на базе преобразователей частоты с асинхронными двигателями с короткозамкнутыми роторами *Электротехника*. 2002;11:6-9.
11. Поляков В.Н. Синхронная машина с электромагнитным продольным возбуждением как объект экстремального управления текст. *Электротехнические системы и комплексы: межвузовский сб. Науч. Тр. Магнитогорск*. 2005;10(1):93-100.
12. Поляков В.Н. *Экстремальное управление электрическими двигателями*. 2006.
13. Ermilina O. V.; Mikhailov P. G.; Semenov A. D.; Sokolov A. V. Extremum Seeking of Asynchronous Electric Drive with Frequency-Current Regulation, *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2020.

REFERENCES

1. Usoltsev A.A. *Frequency control of asynchronous motors*. 2006: 45-46.
2. Kodkin V. L., Anikin A. S., Baldenkov A. A. Experimental research of asynchronous electric drive with positive dynamic feedback on stator current. *Industrial Engineering Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2017 International Conference*. 2017. DOI 10.1109/SIBCON.2015.7146978.
3. Diyoke G. C., Okeke C., Uchechi Aniagwu. Different Methods of Speed Control of Three-Phase Asynchronous Motor. *American Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2016;4(2):62-68.
4. Polyakov V.N. Optimization of steady-state modes of an asynchronized machine. *Electrical systems and complexes: interuniversity collection of scientific*. 2006;12:130-138.
5. Klyuchev V.I. Electric drive theory. 2001; 195-200.
6. Mishchenko V.A. Vector theory of an induction motor. *Electrical engineering*. 2007;6:5-12.
7. Sokolovsky G.G. Variable frequency AC drives. 2006.
8. Klyuchev V.I., Terekhov V.M. *Electric drive and automation of general industrial mechanisms*. 1980.
9. Polyakov V.N. Optimization of steady-state modes of AC motors with phase rotor / AC drives. *International fourteenth scientific and technical. Conf.* 2007;161-164.
10. Andrianov MV, Rodionov RV. Features of power consumption of complete drives based on frequency converters with asynchronous motors with squirrel-cage rotors. *Electrical engineering*. 2002;11:6-9.

11. Polyakov V.N. Synchronous machine with electromagnetic longitudinal excitation as an object of extreme control text. *Electrical systems and complexes: interuniversity collection. Sci. Tr. Magnitogorsk.* 2005;10(1):93-100.
12. Polyakov V.N. *Extreme electric motor control.* 2006.
13. Ermilina O.V.; Mikhailov P.G.; Semenov A.D.; Sokolov A.V. Extremum Seeking of Asynchronous Electric Drive with Frequency-Current Regulation, *2020 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT).* 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ермилина Ольга Викторовна, к.т.н., кафедра, доцент «Автоматика и телемеханика», ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет, Пенза, Российская Федерация,
email: rasuma@mail.ru
ORCID: [0000-0002-7790-7781](https://orcid.org/0000-0002-7790-7781)

Ermilina Olga V. Ph.D., Associate Professor, Automation and Remote Control, Penza State University, Penza, Russian Federation

Семенов Анатолий Дмитриевич, д.т.н., профессор кафедра «Информационно-измерительная техника и метрология», ФГБОУ ВО Пензенский государственный университет, Пенза, Российская Федерация,
email: sad-50@mail.ru

Semenov Anatoliy D. Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Information and Measuring Technology and Metrology department, Penza State University, Penza, Russian Federation