

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ ELECTRICAL ENGINEERING COMPLEXES AND SYSTEMS

УДК 621.331.3.025.3

doi:10.21685/2307-5538-2022-4-9

## КОСВЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. Д. Семенов<sup>1</sup>, С. В. Волков<sup>2</sup>, С. Г. Исаев<sup>3</sup>, С. Е. Ларкин<sup>4</sup>, В. С. Чапаев<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1</sup> sad-50@mail.ru, <sup>2</sup> rtech@pnzgu.ru, <sup>3</sup> eltech@pnzgu.ru, <sup>4</sup> eltech@pnzgu.ru, <sup>5</sup> eltech@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются электроприводы на основе асинхронного двигателя. Предметом исследования является косвенное измерение частоты вращения асинхронного двигателя в таких электроприводах. Целью исследования является построение наблюдателя частоты вращения асинхронного электропривода, позволяющего путем математического моделирования и последующей его настройки получать приемлемые оценки частоты вращения асинхронного двигателя. *Материалы и методы.* Для исследования косвенного измерения частоты вращения асинхронного двигателя использованы методы математического и компьютерного моделирования на базе программного комплекса Matlab для электропривода с асинхронным электродвигателем АИР112МА8, работающим на постоянную нагрузку. *Результаты.* Проведена настройка параметров наблюдателя частоты вращения ротора на компьютерной модели асинхронного двигателя АИР112МА8, результаты которой могут быть использованы для оценки частоты вращения асинхронного электропривода, работающего на заданную нагрузку. *Выводы.* Предложенный подход для оценки косвенного измерения частоты вращения ротора асинхронного двигателя может быть использован при проектировании и эксплуатации асинхронных электроприводов с наблюдателями состояния частоты вращения.

**Ключевые слова:** косвенный метод измерения частоты вращения, уравнения наблюдателей потокосцепления и частоты вращения, Simulink-модель двигателя АИР112МА8, Simulink-модель электропривода, абсолютная погрешность оценки частоты вращения при косвенных измерениях с использованием наблюдателей состояния

**Для цитирования:** Семенов А. Д., Волков С. В., Исаев С. Г., Ларкин С. Е., Чапаев В. С. Косвенное измерение частоты вращения ротора асинхронного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 4. С. 64–70. doi:10.21685/2307-5538-2022-4-9

## INDIRECT MEASUREMENT OF THE ROTOR SPEED OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

A.D. Semenov<sup>1</sup>, S.V. Volkov<sup>2</sup>, S.G. Isaev<sup>3</sup>, S.E. Larkin<sup>4</sup>, V.S. Chapaev<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1</sup> sad-50@mail.ru, <sup>2</sup> rtech@pnzgu.ru, <sup>3</sup> eltech@pnzgu.ru, <sup>4</sup> eltech@pnzgu.ru, <sup>5</sup> eltech@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* The object of research is electric drives based on an asynchronous motor. The subject of the study is the indirect measurement of the rotational speed of an asynchronous motor in such electric drives. The purpose of the study is to construct an observer of the rotational speed of an asynchronous electric drive, which allows, by mathematical modeling and subsequent tuning, to obtain acceptable estimates of the rotational speed of an asynchronous motor. *Materials and methods.* To study the indirect measurement of the rotational speed of an asynchronous motor,

methods of mathematical and computer modeling based on the Matlab software package of an electric drive with an AIR112MA8 asynchronous electric motor operating at a constant load were used. *Results.* The parameters of the rotor rotation frequency observer have been adjusted on a computer model of an AIR112MA8 asynchronous motor, the results of which can be used to estimate the rotation frequency of an asynchronous electric drive operating at a given load. *Conclusions.* The proposed approach for evaluating the indirect measurement of the rotational speed of the rotor of an asynchronous motor can be used in the design and operation of asynchronous electric drives with observers of the rotational speed state.

**Keywords:** indirect method of measuring the rotational speed, equations of flow coupling observers, Simulink-model of the AIR112MA8 engine, full Simulink-model of the electric drive, absolute error of indirect measurements, mechanical coordinates of the rotating electric drive

**For citation:** Semenov A.D., Volkov S.V., Isaev S.G., Larkin S.E., Chapaev V.S. Indirect measurement of the rotor speed of an asynchronous motor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2022;(4):64–70. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-4-9

### Введение

В настоящее время в системах электропривода получили широкое распространение косвенные методы измерения частоты вращения с использованием различных наблюдателей состояния [1, 2]. Сложность настройки наблюдателей конкретного электропривода для получения заданной точности измерения частоты вращения при проектировании различных вариантов асинхронных электроприводов делает тему предлагаемого исследования актуальной.

В данной статье приводятся результаты компьютерного моделирования асинхронного электропривода с наблюдателем состояния, позволяющие проводить настройку наблюдателя состояния для получения заданной погрешности этого измерения.

### Краткое описание метода косвенного измерения частоты вращения

На основе уравнений обобщенной электрической машины [3, 4] в неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  были получены уравнения наблюдателей потокосцеплений ротора, выведенные через параметры цепи статора и ротора:

$$\begin{cases} \Psi_{R\alpha}^S = \frac{1}{k_R} \left( \frac{(U_{S\alpha} - I_{S\alpha} R_S)}{p+1} - \sigma L_S I_{S\alpha} \right); \\ \Psi_{R\beta}^S = \frac{1}{k_R} \left( \frac{(U_{S\beta} - I_{S\beta} R_S)}{p+1} - \sigma L_S I_{S\beta} \right); \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_{R\alpha}}{dt} = \frac{1}{T_R} (L_m I_{S\alpha} - \Psi_{R\alpha}) - \omega_{eR} \Psi_{R\beta}; \\ \frac{d\Psi_{R\beta}}{dt} = \frac{1}{T_R} (L_m I_{S\beta} - \Psi_{R\beta}) + \omega_{eR} \Psi_{R\alpha}. \end{cases} \quad (2)$$

В уравнениях приняты следующие обозначения:  $L_m$  – главная индуктивность АД (индуктивность намагничивания);  $L_S$  – индуктивность рассеяния статора;  $k_R = \frac{L_m}{L_S}$  – коэффициент

связи ротора;  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_S L_R}$  – коэффициент рассеяния;  $T_R = \frac{L_R}{R_R}$  – постоянная времени ротора;  $L_R$  – индуктивность рассеяния ротора;  $R_S$  – сопротивление статора;  $R_R$  – сопротивление ротора;  $\omega_{eR} = z_p \omega_R$  – частота вращения потокосцепления ротора;  $z_p$  – число пар полюсов;  $\omega_R$  – частота вращения ротора.

### Компьютерная Simulink-модель двигателя АИР112МА8

Моделировался электропривод с асинхронным двигателем АИР112МА8. Характеристики электродвигателя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики электродвигателя АИР112МА8

Тип электродвигателя	Мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об. / мин.	Ток статора, А	КПД, %	Коэф. мощности	$I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$	Масса, (IM1081), кг
АИР90L4	2,2	1500	5	81	0,83	6,5	15,0/15,1

В табл. 2 представлены параметры схемы замещения, полученные из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Таблица 2

Параметры T-образной схемы замещения электродвигателя АИР112МА8

Активное сопротивление статора, Ом	Активное сопротивление ротора, Ом	Индуктивность статора, мГн	Индуктивность ротора, мГн	Индуктивность намагничивающего контура, мГн	Приведенный момент инерции, кгм <sup>2</sup>
2,47	2,69	367	378	362	0,02

### Формирование полной Simulink-модели электропривода

Формирование Simulink-модели электропривода осуществляется в соответствии с рекомендациями [5].

Представленным табличным данным и уравнениям (1) и (2) соответствуют следующие Simulink-модели.

Simulink-модель наблюдателей потокосцеплений ротора, полученная через параметры цепи статора (уравнения (1)), будет иметь вид, показанный на рис. 1.

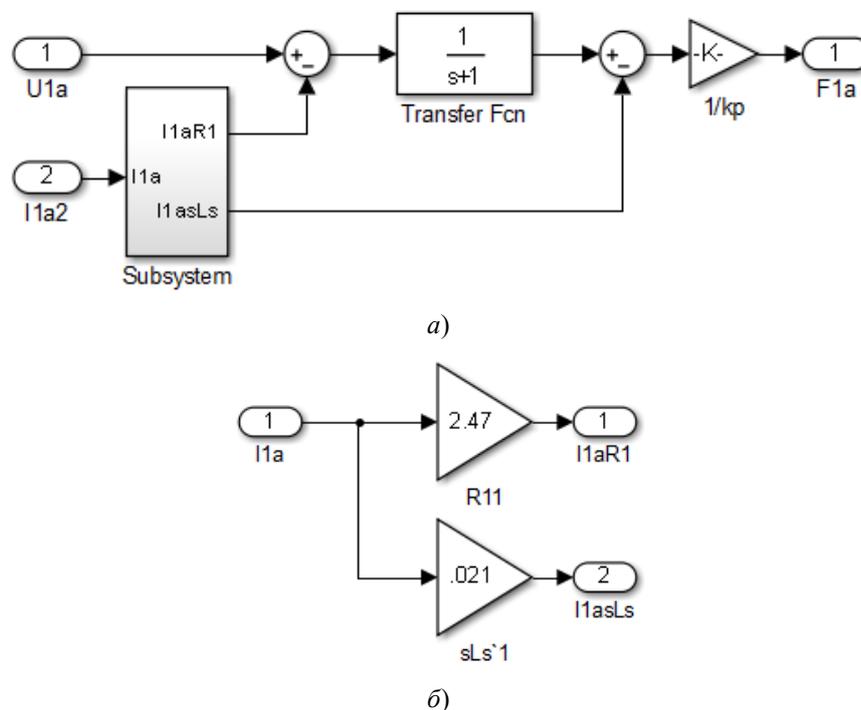


Рис. 1. Simulink-модель наблюдателей потокосцеплений ротора, полученная через параметры цепи статора

На рис. 1 приведена модель только первого уравнения системы (1). Модель второго уравнения будет аналогичная.

Simulink-модель наблюдателей потокосцеплений ротора, полученная через параметры цепи ротора (уравнения (2)), будет выглядеть, как показано на рис. 2.

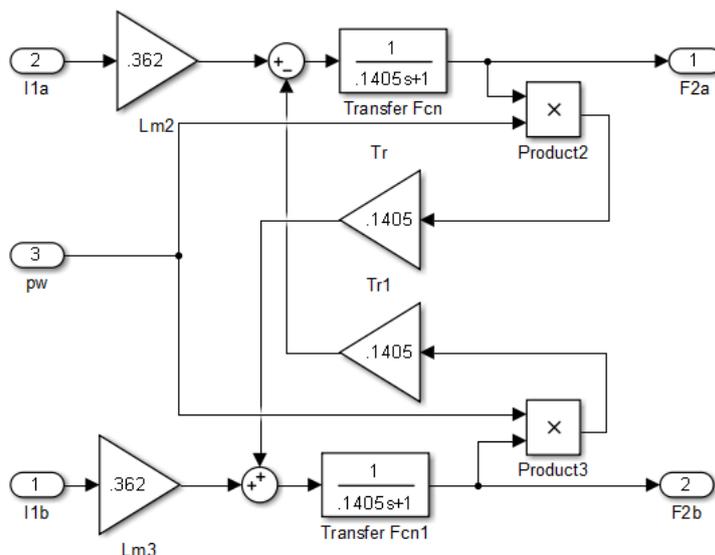


Рис. 2. Simulink-модель наблюдателей потокосцеплений ротора, полученная через параметры цепи ротора

Оценка частоты вращения ротора может быть получена из следующего уравнения. Это не что иное, как векторное произведение векторов потокосцеплений ротора, полученных по уравнениям (1) и (2):

$$\frac{1}{\lambda} \frac{d}{dt} \hat{\omega}_{eR} - (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S) = 0. \quad (3)$$

В уравнении (3) верхние индексы  $S$  и  $R$  соответствуют оценке потокосцеплений ротора, полученные, соответственно, через параметры цепи статора и ротора (уравнения (1) и (2)). Из уравнения (3) следует, что частоту вращения потокосцепления ротора  $\omega_{eR}$  можно оценить по уравнению

$$\hat{\omega}_{eR} = \left( K_p + \frac{K_i}{p} \right) (\hat{\psi}_{R\alpha}^R \hat{\psi}_{R\beta}^S - \hat{\psi}_{R\beta}^R \hat{\psi}_{R\alpha}^S), \quad (4)$$

где  $K_p, K_i$  – пропорциональная и интегральная составляющие ПИ-регулятора.

Объединяя вместе Simulink-модели наблюдателей потокосцеплений ротора, полученные через параметры цепи статора и ротора, и учитывая уравнение (4), получим структурную схему наблюдателя состояния переменных роторной цепи асинхронного двигателя (рис. 3).

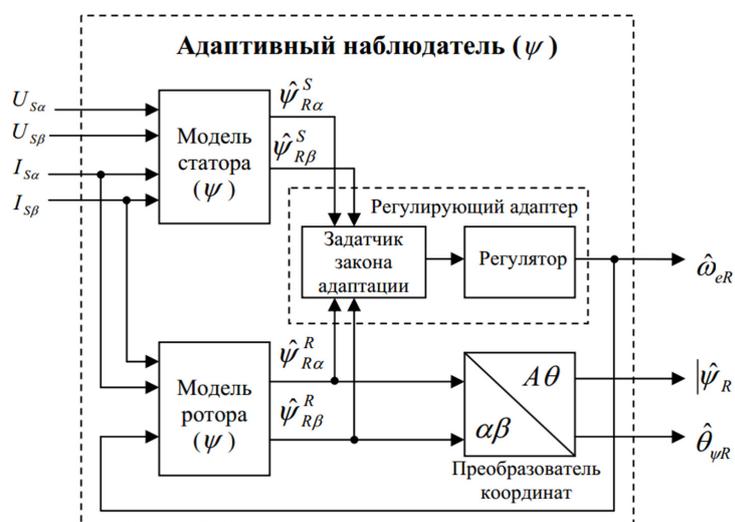


Рис. 3. Структурная схема наблюдателя переменных роторной цепи асинхронного двигателя

Полная Simulink-модель асинхронного двигателя с наблюдателями состояния приведена на рис. 4.

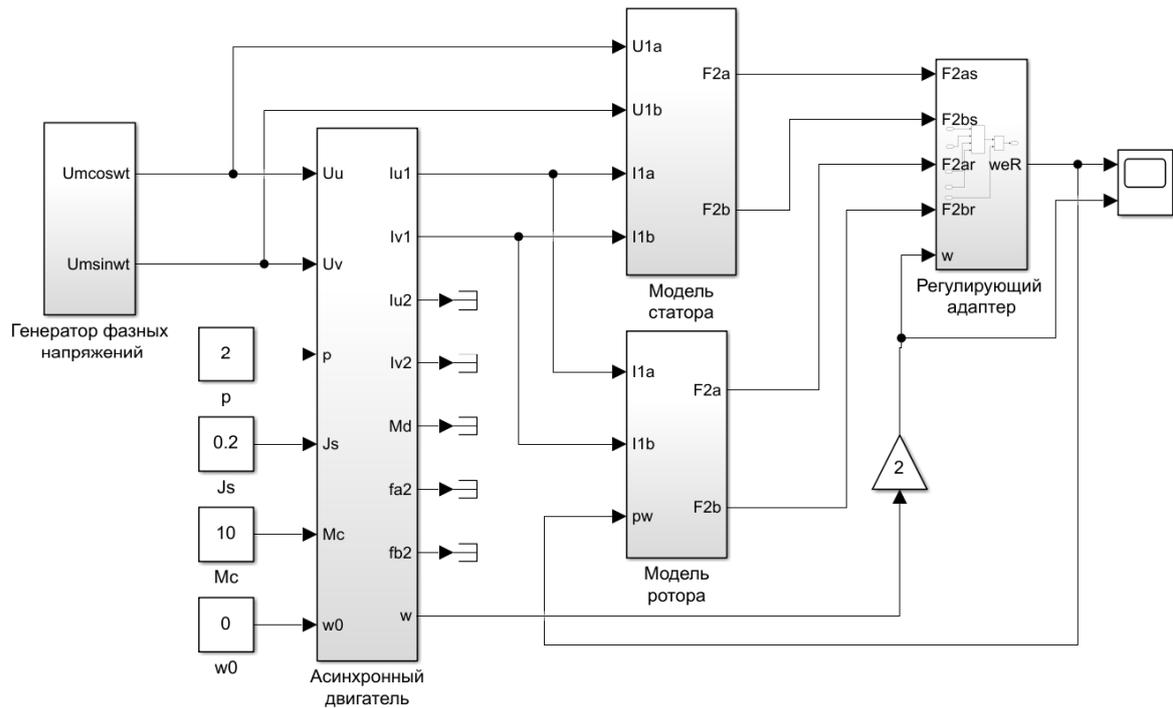


Рис. 4. Полная Simulink-модель асинхронного двигателя с наблюдателями состояния

### **Результаты моделирования электропривода с косвенным измерением частоты вращения**

На рис. 5 показано изменение частоты вращения асинхронного двигателя при пуске под нагрузкой, полученное на выходах модели и наблюдателя состояния.

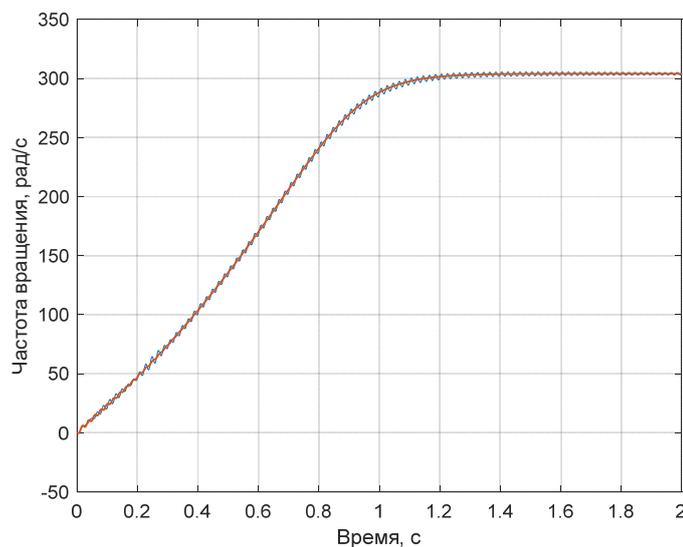


Рис. 5. Изменение частоты вращения асинхронного двигателя при пуске под нагрузкой (модель, наблюдатель состояния)

На рис. 6 показан график абсолютной ошибки наблюдателя состояния, из которого видно, что в результате настройки наблюдателя величина этой ошибки составляет не более  $\pm 3$  рад/с во всем диапазоне изменения скоростей, что вполне приемлемо для подавляющего числа общепромышленных электроприводов.

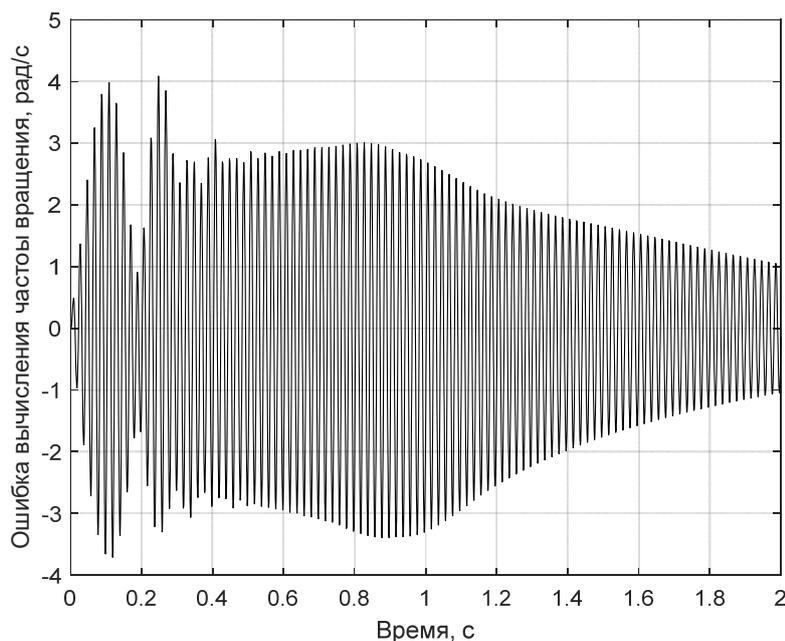


Рис. 6. Абсолютная ошибка наблюдателя состояния

### Заключение

1. Показана возможность косвенного измерения частоты вращения асинхронного двигателя с использованием наблюдателей состояния.

2. Методом моделирования с последующей настройкой параметров наблюдателя удалось получить абсолютную погрешность измерения частоты вращения, не превышающую по абсолютному значению 3 рад/с.

3. Исследованный метод позволяет определять частоту вращения асинхронного электропривода с приемлемой для общепромышленных электроприводов точностью, измеряя напряжение и ток статора.

### Список литературы

1. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново : Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2008. 298 с.
2. Калачев Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М., 2015. 60 с.
3. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учебник для вузов. М. : Академия, 2006. 272 с.
4. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М. : Энергия, 1964. 312 с.
5. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб. : КОРОНА-Век, 2008. 368 с.

### References

1. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka = Vector control of AC electric drives*. Ivanovo: Ivanovskiy gosudarstvennyy energeticheskiy universitet imeni V. I. Lenina, 2008:298. (In Russ.)
2. Kalachev Yu.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprivoде = State observers in a vector electric drive*. Moscow, 2015:60. (In Russ.)
3. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem: uchebnik dlya vuzov = Alternating current electric drives with frequency regulation : textbook for universities*. Moscow: Akademiya, 2006:272. (In Russ.)
4. Uayt D., Vudson G. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii = Electromechanical energy conversion*. Moscow: Energiya, 1964:312. (In Russ.)
5. German-Galkin S.G. *Matlab & Simulink. Proektirovaniye mekhatronnykh sistem na PK = Matlab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC*. Saint Petersburg: KORONA-Vek, 2008:368. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Анатолий Дмитриевич Семенов**

доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры информационно-  
измерительной техники и метрологии,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: sad-50@mail.ru

**Anatoly D. Semenov**

Doctor of technical sciences, associate professor,  
professor of the sub-department of information  
and measurement equipment and metrology,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Сергей Владимирович Волков**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Sergey V. Volkov**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of radio engineering and radio electronic systems,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Сергей Геннадьевич Исаев**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроэнергетики  
и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: eltech@pnzgu.ru

**Sergey G. Isaev**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of electric power and electrical engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Сергей Евгеньевич Ларкин**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры электроэнергетики  
и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: eltech@pnzgu.ru

**Sergey E. Larkin**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of the sub-department  
of electric power and electrical engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Вячеслав Сергеевич Чапаев**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры электроэнергетики  
и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: eltech@pnzgu.ru

**Vyacheslav S. Chapaev**

Candidate of technical sciences,  
associate professor of the sub-department  
of electric power and electrical engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 21.04.2022**

**Поступила после рецензирования / Revised 23.05.2022**

**Принята к публикации / Accepted 27.06.2022**