

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 621.311.16

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_3_26

Анализ методов расчета надежности электроэнергетических систем

Игорь Вячеславович Лакомов^{1✉}, Юрий Михайлович Помогаев²

^{1, 2}Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, Воронеж, Россия

¹lakomov1960@yandex.ru✉

Аннотация. Обеспечение экономически обоснованного уровня надежности электроснабжения предполагает учет ущерба в промышленности и сельском хозяйстве страны, вызванного отказами системы электроснабжения. Отказы в работе энергетической системы сопровождаются недоотпуском электроэнергии потребителям (отклонением эксплуатационных характеристик системы за допустимые пределы), а также приводят к затратам на восстановление отказавшего оборудования и технологического процесса. Следовательно, в состав государственного ущерба должны входить все затраты, являющиеся дополнительными к оптимальным затратам на производство продукции. В настоящее время разработаны и продолжают разрабатываться методы определения государственного ущерба от нарушения надежности энергосистемы. Методика определения ущерба базируется на расчетных оценках и на анализе фактических затрат энергосистем и потребителей. Наличие определенной величины ущерба позволяет производить технико-экономическое обоснование уровня надежности схемы электроснабжения и предлагать те или иные мероприятия по минимизации экономических и технических потерь. Государственный ущерб целесообразно анализировать на основе его разделения на отдельные составляющие из-за ограничений потребителей, из-за внезапных отказов системы электроснабжения, из-за реализации и потребления некондиционной энергии (несоответствующей нормативным параметрам качества). При этом необходимо учитывать, что перечисленные составляющие ущерба состоят из ущерба в энергосистеме и ущерба у потребителей. Выполнен сравнительный анализ методов, алгоритмов и программ расчетов надежности электроснабжения объектов, входящих в энергосистему страны. Сделан вывод о том, что наиболее объективную и точную оценку дает метод статистического моделирования, так как позволяет учесть эксплуатационную политику при различных аварийных ситуациях в энергосистеме, т. е. в наибольшей степени соответствует реальным условиям эксплуатации системы.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, анализ надежности системы, поток событий, поток отказов, метод статистического моделирования, вероятность отказов, показатели надежности

Для цитирования: Лакомов И.В., Помогаев Ю.М. Анализ методов расчета надежности электроэнергетических систем // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2022. Т. 15, № 3(74). С. 26–32. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_3_26-32.

ELECTROTECHNOLOGIES AND ELECTRIC EQUIPMENT IN AGRICULTURE (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Analysis of methods for electric power systems reliability calculation

Igor V. Lakomov^{1✉}, Yuriy M. Pomogaev²

^{1, 2}Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹lakomov1960@yandex.ru✉

Abstract. Ensuring an economically reasonable level of reliability of electric power supply involves taking into account accident damage in industry and agriculture of the country caused by failures of the power supply system. Failures in the operation of the energy system are accompanied by customers curtailment (deviation of the operational characteristics of the system beyond acceptable limits), and also lead to costs for performance restoration of failed equipment and technological process. Consequently, the budgetary damage should include all costs that are additional to the optimal production costs. Currently, different methods have been developed and continue to be developed for determining budgetary damage from a violation of the reliability of the electric power system. The methodology for damage calculating is based on the accounting estimates and on the analysis of the actual costs of electric power systems and consumers. Due to reasonable amount of damage it is now possible to make a feasibility study of the reliability level of the power supply scheme, and to propose certain measures aimed at minimizing economic and technical losses. It is advisable to analyze budgetary damage on the basis of its division into separate components due to consumer constraint, due to sudden failures of the electric power supply system, due to the sale and consumption of substandard energy (inconsistent with quality standards). At the same time,

it should be taken into account that the listed components of damages consist of damage in the power system and damage to consumers. A comparative analysis of methods, algorithms and programs for calculating the reliability of power supply of objects included in the country's energy system is carried out. It is concluded that the most objective and accurate assessment is given by the statistical modeling method, since it allows taking into account the operational policy in various emergency situations in the power system, i.e. it most closely corresponds to the actual operating conditions of the system.

Keywords: electric power system, system reliability analysis, flow of events, flow of failures, statistical modeling method, failure probability, reliability indicators

For citation: Lakomov I.V., Pomogaev Yu.M. Analysis of methods for electric power systems reliability calculation. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2022;15(3):26-32. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_3_26-32.

Методы расчетов надежности электроэнергетических систем можно разделить на три группы: на основе использования элементов теории случайных событий, случайных процессов и статистического моделирования. Рассмотрим некоторые из этих методов.

Вероятностный метод расчета надежности схем электрических соединений

Данный метод используют при расчете показателей надежности электроснабжения схем распределительных сетей электроэнергетических систем (ЭЭС) с сильными связями, для которых можно не учитывать ограничения пропускной способности связей и влияния этого на надежность электроснабжения.

Наиболее распространенной является реализация данного метода в программах научно-исследовательского института электроэнергетики. В них по функциям распределения времени интервалов между ремонтами и времени ремонтов отдельных элементов моделируются случайным образом моменты вывода в ремонт и продолжительность ремонта элементов схемы, т. е. реализуется случайный поток событий в системе. Этот поток обрабатывается с целью учета особенностей функционирования ЭЭС (исключается совпадение планового ремонта с аварией на резервируемом элементе и т. п.) [2, 8].

На этой модели производится анализ надежности системы. Условия появления тех или иных состояний выявляются при подготовке к расчету и загружаются в базу данных ЭВМ. В процессе статистического моделирования эти условия распознаются и фиксируются. В результате вычисляются показатели, характеризующие частоту и длительность всех учитываемых состояний.

Программа позволяет рассчитывать схемы, содержащие до 45 элементов. Отличительной особенностью программы является гибкость при задании состояний схемы, позволяющая формулировать различные задачи расчета надежности схем.

Метод расчета надежности на уровне случайных процессов

В методе, который опирается на теорию случайных марковских процессов, используются гипотезы о простейшем характере потока отказов элементов системы (поток считается стационарным, ординарным и без последствия) и об экспоненциальном распределении времени их восстановления. Напомним, что физический процесс марковского типа предполагает, что каждое следующее состояние зависит только от предыдущего, а не от всей предыстории процесса. Число переходов системы из одного состояния в другое конечно [3].

Параметры потоков отказов λ_i и восстановления μ_i элементов системы при этом постоянны.

При указанных предположениях изменение состояний системы описывается стационарным марковским процессом, дискретным в пространстве и непрерывным во времени.

Рассмотрим простейший случай использования этого метода.

Пусть система может находиться в двух состояниях:

E_I – работоспособном;

E_{II} – неработоспособном.

Параметр потока отказов системы в работоспособном состоянии λ (1/час), а интенсивность восстановления из неработоспособного состояния – μ (1/час).

Используем граф переходов для вывода уравнений, описывающих процесс переходов (рис. 1).

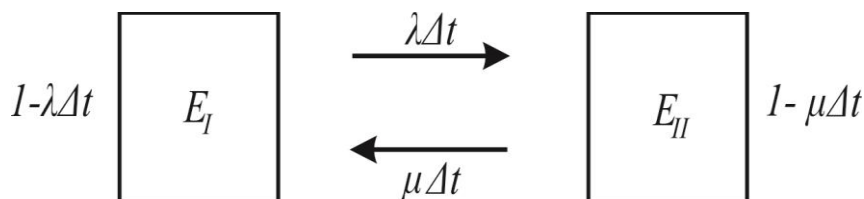


Рис. 1. Граф переходов системы

В момент t система находилась в состоянии E_I с вероятностью $P_I(t)$. К моменту $t + \Delta t$ система с вероятностью $P_I(t)(1 - \lambda\Delta t)$ останется в том же состоянии E_I и с вероятностью $P_{II}(t)\mu\Delta t$ перейдет в состояние E_I из состояния E_{II} . Отсюда по теореме сложения вероятностей [6]

$$P_I(t + \Delta t) = P_I(t)(1 - \lambda\Delta t) + P_{II}(t)\mu\Delta t. \quad (1)$$

Преобразуем (1) к следующему виду:

$$\frac{P_I(t + \Delta t) - P_I(t)}{\Delta t} = -\lambda P_I(t) + \mu P_{II}(t). \quad (2)$$

Затем, переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим дифференциальное уравнение

$$P_I'(t) = -\lambda P_I(t) + \mu P_{II}(t). \quad (3)$$

Аналогично выводится второе дифференциальное уравнение перехода из состояния E_{II} в E_I , и система имеет вид

$$\begin{cases} P_I'(t) = -\lambda P_I(t) + \mu P_{II}(t) \\ P_{II}'(t) = \lambda P_I(t) - \mu P_{II}(t) \end{cases}.$$

На представленном на рисунке 1 графе переходов системы рядом со стрелками, показывающими направление переходов, указаны вероятности этих переходов за время Δt . При начальных условиях $P_I(0) = 1$, $P_{II}(0) = 0$ и, учитывая, что $P_I(t) + P_{II}(t) = 1$, решение приведенных выше уравнений будет иметь вид

$$\begin{cases} P_I(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right) \\ P_{II}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left(1 - \frac{\lambda}{\mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right) \end{cases}. \quad (4)$$

При достаточно большом значении t процесс переходов устанавливается и P_{II} , P_I перестают зависеть от t :

$$P_I(\infty) = \frac{\mu}{\mu + \lambda}; \quad P_{II}(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}.$$

Величина $P_I(\infty)$ является коэффициентом готовности системы. Действительно, так как $\mu = \frac{1}{T_{рем}}$, $\lambda = \frac{1}{T_{раб}}$, то

$$P_I(\infty) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{T_{раб}}{T_{рем} + T_{раб}} = K_G,$$

где $T_{рем}$ – время восстановления;

$T_{раб}$ – наработка на отказ.

Справедливость проделанных вычислений подтверждается свойствами эргодичности марковского процесса, когда предельное распределение вероятностей состояний не зависит от их начального распределения.

Для рассмотренной системы с двумя состояниями и описывающей ее системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} P'_I(t) = -\lambda P_I(t) + \mu P_{II}(t) \\ P'_{II}(t) = \lambda P_I(t) - \mu P_{II}(t) \end{cases} \quad (5)$$

можно ввести матрицу переходов, или стохастическую матрицу переходных вероятностей. Марковский процесс полностью определен, если заданы все условия вероятности перехода из одного состояния системы в другое и начальное состояние системы.

Элемент стохастической матрицы $\|P\|_{sk}$ равен вероятности перехода системы из состояния s в состояние k .

Для определения переходных вероятностей используется диаграмма переходов системы (рис. 2).

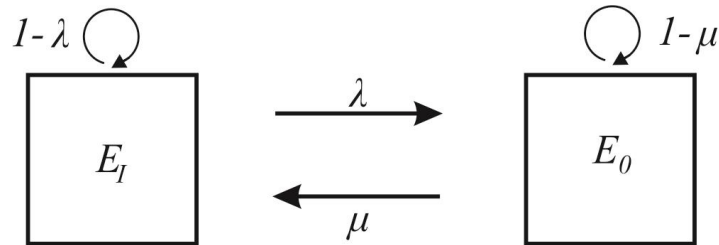


Рис. 2. Диаграмма переходов системы

Для данного примера стохастическая матрица имеет вид

$$\|P\| = \begin{vmatrix} 1 - \lambda & \lambda \\ \mu & 1 - \mu \end{vmatrix}.$$

Сумма элементов стохастической матрицы по любой строке равна 1, это значит, что сумма вероятностей перехода из любого состояния в другое состояние (включая и его само) равна 1, т. е. происходит одно из этих событий.

С использованием стохастической матрицы систему (5) можно записать

$$\begin{vmatrix} P'_{II}(t) \\ P'_I(t) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_I(t) & P_{II}(t) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{vmatrix}.$$

Здесь матрица размерности 2×2 получена из стохастической вычитанием единицы из всех ее диагональных элементов.

В общем виде дифференциальные уравнения в матричной форме можно записать

$$\|P'_s(t)\| = \|P_s(t)\| \times \|\tilde{P}\|,$$

где матрица $\|\tilde{P}\|$ получается из стохастической матрицы $\|P\|$ вычитанием единицы из всех ее диагональных элементов.

Таким образом, следует отметить, что расчет надежности системы на уровне случайных процессов с использованием теории марковских процессов состоит из нескольких основных этапов.

1. Установление соответствия реального потока отказов и принимаемого в модели простейшего потока отказов.
2. Построение диаграммы переходов и определение переходных вероятностей.
3. Составление стохастической матрицы переходных вероятностей и соответствующей системы дифференциальных уравнений.

4. Решение системы дифференциальных уравнений и определение вероятностей различных состояний системы для любого момента времени.

Решение задачи в общем виде возможно лишь для простейших случаев, когда размерность стохастической матрицы не превышает 20–30.

Метод марковских процессов применяется также для расчета и оптимизации показателей надежности отдельных объектов и установок, например выключателей. В этом случае учитывается вероятность перехода установки в неработоспособное состояние и оптимизируется интенсивность проведения профилактических и аварийно-восстановительных работ по критерию проведенных затрат, коэффициенту готовности и т. п. [5].

Метод статистического моделирования

Сложность современных электроэнергетических систем, большое количество факторов, влияющих на показатели надежности, необходимость учета ситуаций, возникающих в системе при отказе отдельных элементов, не всегда позволяют эффективно использовать аналитические методы определения показателей надежности этих систем [4, 7]. Заметим также, что эти методы не учитывают причинно-следственные явления, возникающие в процессе функционирования ЭЭС (последствия отказов, развитие аварий, роль диспетчера системы и т. д.).

Эти трудности преодолеваются с помощью метода статистического моделирования. Необходимые сведения о системе находятся в виде стохастических характеристик, получаемых путем многократного воспроизведения некоторой формализованной модели системы, имитирующей с той или иной точностью реальную систему и протекающие в ней процессы. Состояния элементов системы описываются любыми предполагаемыми законами распределения, по которым в ходе моделирования определяются моменты изменения состояния элемента и, как следствие этого, изменение состояний и параметров системы [10].

Метод статистического моделирования может быть реализован по следующей схеме.

1. Рассматриваются значения случайных величин схемы и состояний элементов системы по их заданным вероятностным характеристикам, например функциям распределения.

2. Производятся независимые опыты, т. е. для каждой выборки реализаций значений случайных величин воспроизводится математическая модель системы или алгоритм определения ее параметров.

3. По совокупности реализаций модели, построенных в независимых опытах, производится расчет статистических функционалов и функций распределения показателей надежности системы.

Теоретической основой метода является закон больших чисел, устанавливающий при определенных условиях предельное равенство среднего арифметического случайной величины математическому ожиданию этой случайной величины при бесконечном увеличении числа опытов.

На основании количественной формы закона больших чисел и центральной предельной теоремы Ляпунова можно выполнить оценку точности метода статистических испытаний.

Осуществляется серия ξ независимых испытаний, каждый раз с новым возможным значением X_1, X_2, \dots, X_ξ случайной величины X .

Очевидно, что среднее арифметическое этой величины равно

$$X = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_\xi}{\xi}.$$

Согласно теореме Ляпунова, при больших ξ величина X распределяется по нормальному закону и с вероятностью большей, чем 0,997, т. е. практически во всех случаях

$$|\bar{X} - M_X| \leq \varepsilon = 3 \frac{\sigma}{\sqrt{\xi}},$$

где M_X – математическое ожидание X ;

σ – среднее квадратичное отклонение случайной величины;

ε – погрешность метода статистических испытаний.

Погрешность убывает обратно пропорционально корню квадратному из числа независимых испытаний.

Для получения требуемой точности вычислений можно найти оценку необходимого числа испытаний

$$\xi = \frac{9\sigma^2}{\varepsilon^2},$$

т. е. для повышения точности вычислений на один порядок следует увеличить число испытаний на два порядка. Это в значительной степени ограничивает размер системы, рассчитываемой данным методом, и точность получаемых показателей надежности [9].

Определение показателей надежности может быть организовано на базе анализа как случайных событий, так и случайных процессов. В первом случае последовательно для каждого дискретного интервала выбираются случайные состояния элементов системы и значения нагрузок потребителей, в соответствии с которыми определяются дефициты мощности в этих интервалах. Многократное повторение этой процедуры позволяет найти показатели надежности [1].

Во втором случае строится случайный поток аварий элементов системы для всего периода, затем для отдельных дискретных интервалов периода выбираются случайные значения нагрузки потребителей и определяются дефициты мощности в этих интервалах.

Выводы

Сравнительный анализ методов расчета надежности электроснабжения распределительных сетей электроэнергетических систем позволяет сделать вывод о том, что наиболее объективную и точную оценку дает метод статистического моделирования.

Статистическое моделирование процесса функционирования системы позволяет учесть эксплуатационную политику при различных аварийных ситуациях в энергосистеме, т. е. в наибольшей степени соответствует реальным условиям эксплуатации системы.

Список источников

1. Александров Д.С., Щербakov Е.Ф. Надежность и качество электроснабжения предприятий: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 155 с.
2. Анищенко В.А., Колосова И.В. Основы надежности систем электроснабжения: пособие для студентов вузов. Минск: БНТУ, 2007. 151 с.
3. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования: применительно к задачам электроэнергетики: учебник для студентов вузов. 4-е изд. Москва: URSS, 2014. 406 с.
4. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учебное пособие для студентов вузов. 4-е изд., стер. Москва: КНОРУС, 2014. 645 с.
5. Захаренко С.Г., Малахова Т.Ф., Захаров С.А. Анализ аварийности в электросетевом комплексе // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 4. С. 95–98.
6. Непомнящий В.А. Учет надежности при проектировании энергосистем. Москва: Энергия. 1978. 165 с.
7. Папков Б.В., Шарыгин М.В. Требования к решению проблемы надежности электроснабжения // Энергетическая политика. 2015. № 2. С. 47–54.
8. Помогаев Ю.М., Картавцев В.В., Лакомов И.В. Методика оценки показателей надежности сельских распределительных сетей при различных схемах резервирования // Агропромышленный комплекс на рубеже веков: материалы международной научно-практической конференции, посв. 85-летию агроинженерного факультета Воронежского ГАУ (Воронеж, 26–27 ноября 2015 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. С. 288–302.

9. Помогаев Ю.М., Картавец В.В., Лакомов И.В. Практикум по электроснабжению «Надежность и режимы»: учебное пособие. Воронеж: ФГБОУ Воронежский ГАУ, 2016. 191 с.
10. Шеметов А.Н. Надежность электроснабжения: учебное пособие для студентов вузов. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. 141 с.
11. DOE Global Energy Storage Database. Information on grid-connected energy storage projects and relevant state and federal policies // The Official Hub for Global Energy Storage Data. November 10, 2020. URL: <https://catalog.data.gov/dataset/doe-global-energy-storage-database>.

References

1. Aleksandrov D.S., Shcherbakov E.F. Nadezhnost' i kachestvo elektrosnabzheniya predpriyatij: uchebnoe posobie [Reliability and quality of power supply of enterprises: textbook]. Ulyanovsk: Ulyanovsk State Technical University Press; 2010. 155 p. (In Russ.).
2. Anishchenko V.A., Kolosova I.V. Osnovy nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya: posobie dlya studentov vuzov [Fundamentals of reliability of power supply systems: a manual for graduate students]. Minsk: Belarusian National Technical University Press; 2007. 151 p. (In Russ.).
3. Venikov V.A., Venikov G.V. Teoriya podobiya i modelirovaniya: primenite'no k zadacham elektroenergetiki: uchebnik dlya studentov vuzov. 4-e izd. [Theory of similarity and modeling: in relation to electric power industry problems: textbook for graduate students. 4th edition]. Moscow: URSS; 2014. 406 p. (In Russ.).
4. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. 4-e izd., ster. [Transmission and distribution of electric energy: textbook for graduate students. 4th edition, stereotype]. Moscow: KNORUS; 2014. 645 p. (In Russ.).
5. Zakharenko S.G., Malakhova T.F. Analiz avarijnosti v elektrossetevom komplekse [Analysis of emergency power industry]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2016;4:95-98. (In Russ.).
6. Nepomnyashchy V.A. Uchet nadezhnosti pri proektirovanii energosistem [Reliability accounting in the design of power systems]. Moscow: Energiya; 1978. 165 p. (In Russ.).
7. Papkov B.V., Sharygin M.V. Trebovaniya k resheniyu problemy nadezhnosti elektrosnabzheniya [The requirements to solving the problem of reliability in energy procurement]. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*. 2015;2:47-54. (In Russ.).
8. Pomogaev Yu.M., Kartavtsev V.V., Lakomov I.V. Metodika otsenki pokazatelej nadezhnosti sel'skikh raspredelitel'nykh setej pri razlichnykh skhemakh rezervirovaniya [Methodology for assessing reliability indicators of rural distribution networks with various redundancy schemes]. *Agropromyshlennyj kompleks na rubezhe vekov: materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, posv. 85-letiyu agroinzhenernogo fakul'teta Voronezhskogo GAU (Voronezh, 26–27 noyabrya 2015 g.)* [Agro-Industrial Complex at the turn of the century: Proceedings of the International scientific and practical conference, dedicated to the 85th anniversary of the Faculty of Rural Engineering of Voronezh State Agrarian University (Voronezh, November 26-27, 2015)]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2015:288-302. (In Russ.).
9. Pomogaev Yu.M., Kartavtsev V.V., Lakomov I.V. Praktikum po elektrosnabzheniyu "Nadezhnost' i rezhimy": uchebnoe posobie [Workshop on power supply "Reliability and feeding modes": study guide]. Voronezh: Voronezh State Agrarian University Press; 2016. 191 p. (In Russ.).
10. Shemetov A.N. Nadezhnost' elektrosnabzheniya: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov [Reliability of electric power supply: a textbook for graduate students]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2006. 141 p. (In Russ.).
11. DOE Global Energy Storage Database. Information on grid-connected energy storage projects and relevant state and federal policies. DataGov. November 10, 2020. URL: <https://catalog.data.gov/dataset/doe-global-energy-storage-database>.

Информация об авторах

И.В. Лакомов – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», lakomov1960@yandex.ru.

Ю.М. Помогаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», pomoyurij@yandex.ru.

Information about the authors

I.V. Lakomov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, lakomov1960@yandex.ru.

Yu.M. Pomogaev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, pomoyurij@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 24.08.2022; одобрена после рецензирования 28.09.2022; принята к публикации 29.09.2022.

The article was submitted 24.08.2022; approved after revision 28.09.2022; accepted for publication 29.09.2022.

© Лакомов И.В., Помогаев Ю.М., 2022