

УДК 621.311.25

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_38

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

**Д.М. Кочеганов**

ORCID: 0009-0009-5128-2144 e-mail: dk402@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.В. Серебряков**

ORCID: 0000-0002-2050-3241 e-mail: artemserebryakov@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.С. Стеклов**

ORCID: 0000-0002-8122-3358 e-mail: steklov84@mail.ru

АО «ОКБМ Африкантов»  
*Нижний Новгород, Россия*

Разработана имитационная модель системы количественной оценки технического состояния оборудования солнечной электростанции малой мощности в среде *Matlab Simulink*. Предложена модификация существующего подхода к определению количественной оценки технического состояния, основанного на вычислении индекса технического состояния оборудования. Разработана система количественной оценки технического состояния оборудования с использованием аппарата нечеткой логики Мамдани-Заде, генерирующая количественную оценку технического состояния оборудования на основании диагностических параметров. Использование аппарата нечеткой логики с перечнем экспертных правил позволяет в полной мере учесть нелинейность объектов диагностики, наличие специфических комбинаций величин диагностических признаков, а также их эмерджентные свойства, что не удастся сделать при использовании существующего подхода по вычислению индекса технического состояния с использованием формулы и весовых коэффициентов для различных диагностических признаков. Полученная количественная оценка технического состояния оборудования обрабатывается при помощи сети с долгой кратковременной памятью (*Long Short Term Memory network, LSTM*), формируя прогноз технического состояния оборудования на заданном временном отрезке. Описываемая система количественной оценки технического состояния оборудования может быть использована для поддержки принятия решений оператором электроэнергетической установки при определении необходимости ремонта и замены оборудования.

**Ключевые слова:** индекс технического состояния, количественная оценка технического состояния, нечеткая логика.

Для цитирования: Кочеганов Д.М., Серебряков А.В., Стеклов А.С. Количественная оценка технического состояния оборудования солнечной электростанции // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 38-50.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_38

## TECHNICAL CONDITION QUANTITATIVE ASSESSMENT OF SOLAR POWER PLANT EQUIPMENT

**D.M. Kocheganov**

ORCID: **0009-0009-5128-2144** e-mail: **dk402@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Serebryakov**

ORCID: **0000-0002-2050-3241** e-mail: **artemserebryakov@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.S. Steklov**

ORCID: **0000-0002-8122-3358** e-mail: **steklov84@mail.ru**  
JSC «OKBM Afrikantov»  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The development of a Matlab Simulink model of a system for quantitative assessment of the technical condition of the small solar power plant equipment is described. Small solar power plant consists of photoelectric converters, voltage inverter, 10 kVA active-inductive electric load ( $\cos\phi$  0.9). It is proposed to modify the existing approach to determining the quantitative assessment of the technical condition based on the calculation of the index of the equipment technical condition. A system of quantitative assessment of the equipment technical condition using the apparatus of Mamdani-Zadeh fuzzy logic was developed. It generates the quantitative assessment of the equipment technical condition based on diagnostic parameters by the basis of expert rules. The expert rule-based fuzzy logic allows to take into account non-linearity of diagnostic objects, the presence of specific combinations of diagnostic features, as well as their emergency properties, which cannot be done when using the existing approach to calculating the technical condition using formulas and weight coefficients for various diagnostic features. The resulting quantitative assessment of the equipment technical condition is processed using a Long Short Term Memory network (LSTM), forming a forecast of the equipment technical condition at a given time period. The proposed system of quantitative assessment of the equipment technical condition can be used to support the decision of the electric power plant operator in determining the need to repair and replace equipment.

**Keywords:** technical condition index, technical condition quantitative assessment, fuzzy logic.

**For citation:** D.M. Kochegyanov, A.V. Serebryakov and A.S. Steklov, “Technical condition quantitative assessment of solar power plant equipment”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 38-50, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_38

## 1. Введение

Для поддержания работоспособности электротехнического оборудования общепринятой практикой в настоящее время является проведение планового технического обслуживания, в ходе которого осуществляется оценка технического состояния оборудования и принимается решение о необходимости его ремонта или замены. В качестве исходной для определения периодичности планового технического обслуживания выступает информация о надежности элементов (интенсивность отказов, среднее время безотказной работы), предоставляемых производителем на основании результатов испытаний определенного количества образцов. Но, поскольку условия эксплуатации и события, возникающие при работе каждого конкретного образца оборудования, уникальны, каждая единица оборудования может выйти из строя раньше или позже срока, заявленного производителем. В связи с этим, для предупреждения внезапных отказов и уменьшения затрат на проведение планового технического обслуживания, происходит переход к техническому обслуживанию по состоянию, для чего необходимо осуществлять мониторинг технологических и физических параметров оборудования, а также использовать не только качественную оценку технического состояния оборудования, но и количественную, позволяющую отслеживать динамику его изменения, осуществлять ранжирование и прогнозирование. Разработки данных систем мониторинга ведут такие научно-производственные компании, как Систэм Электрик (*Systeme Electric*), *Semiotic Labs*, *CMS Condition Monitoring Systems*, *Dynapar*, *Briuel & Kjaer Vibro*, *Ifm efector Canada*. В научных работах предлагаются различные подходы по оценке технического состояния оборудования: методом реконструкционного моделирования [1], спектрального анализа [2] и др.

В законодательстве РФ закреплена методика количественной оценки путем вычисления индекса технического состояния оборудования [3]. Предлагаются ее различные видоизменения [4-8], направленные на увеличение достоверности оценки технического состояния путем корректировки весовых коэффициентов и формул, по которым вычисляется индекс технического состояния оборудования. Однако данный подход характеризуется значительной линеаризацией свойств объекта оценки технического состояния и может привести к игнорированию некоторых эмерджентных свойств объекта, а также специфических комбинаций величин диагностических признаков, что негативно сказывается на корректности оценки технического состояния.

Целью исследования является получение количественной оценки и

прогнозирование технического состояния оборудования солнечной электростанции малой мощности, для чего решается задача разработки имитационной модели солнечной электростанции с системой количественной оценки и прогнозирования технического состояния оборудования.

## II. Методы исследования

В качестве основного метода исследования в рамках данной работы используется имитационное моделирование в среде *Matlab Simulink* с применением расширений *Fuzzy Logic Toolbox* и *Deep Network Designer*. На рис. 1 представлена имитационная модель в среде *Matlab Simulink*.

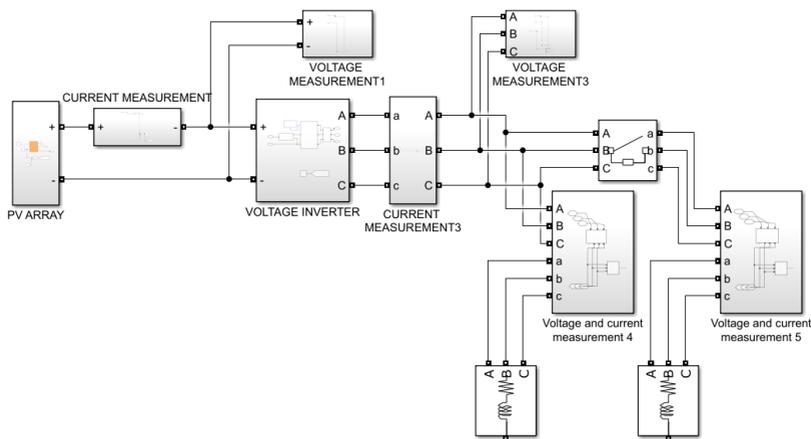


Рис. 1. Имитационная модель солнечной электростанции в *Matlab Simulink*

Fig. 1. Solar power plant Simulink model

Имитационная модель включает следующие элементы: блок фотоэлектрических модулей *PV Array* с номинальной электрической мощностью 10 кВт, трехфазный мостовой инвертор напряжения, блоки трехфазной электрической нагрузки с  $\cos\phi$  0,9 мощностью 10 кВА. Величины диагностических признаков, полученные в результате имитационного моделирования, передаются в систему количественной оценки и прогнозирования технического состояния. В данной работе предлагается новый подход, заключающийся в построении экспертной системы, вычисляющей количественную оценку технического состояния (КОТС) оборудования на основании величин диагностических признаков по установленному перечню логических правил, что позволяет при формировании оценки в полной мере учесть любые характерные состояния объекта оценки и комбинации величин диагностических признаков. Для обеспечения робастности системы применяется аппарат нечеткой логики Мамдани-Заде [9-11]. Структурная схема системы представлена на рис. 2.

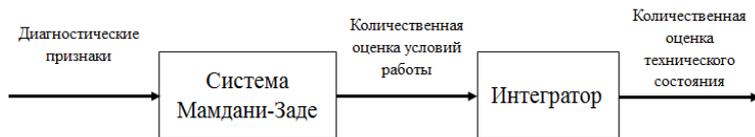


Рис. 2. Структурная схема системы КОТС

Fig. 2. Structural diagram of the technical condition quantitative assessment system

В качестве диагностических признаков фотоэлектрических преобразователей были выбраны: температура фотоэлектрических преобразователей, ток, напряжение, освещенность; в качестве диагностических признаков инвертора напряжения – температура силовых ключей преобразователя, выходные линейные напряжения инвертора, выходные токи фаз инвертора. Поскольку данная система является демонстрационной и не имеет привязки к конкретному образцу оборудования, перечень диагностических признаков, вид функций принадлежности и набор логических правил подлежат уточнению. Физические величины выражаются в относительных единицах.

Таблица 1.  
Логические правила

Table 1.  
Rules

Фотоэлектрический преобразователь					
№	Напряжение	Ток	Температура	Освещенность	КОУР
1	Нормальный	Нормальный	Нормальный	Нормальный	Хороший
2	Высокий	Нормальный	Нормальный	Высокий	Нормальный
3	Низкий	Нормальный	Нормальный	Низкий	Нормальный
4	Высокий	Высокий	Высокий	–	Низкий
5	Низкий	Высокий	Не нормальный	Нормальный	Низкий
6	Низкий	Не нормальный	–	Нормальный	Низкий
Инвертор напряжения					
№	Напряжение	Ток	Температура	КОУР	
1	Нормальный	Нормальный	Нормальный	Хороший	
2	Высокий	Нормальный	Низкий	Нормальный	
3	Низкий	Нормальный	Нормальный	Нормальный	
4	Высокий	Высокий	Не нормальный	Низкий	
5	Высокий	Низкий	Низкий	Низкий	
6	Низкий	Высокий	Нормальный	Нормальный	

Для величин каждого из диагностических признаков используются термины «Низкий», «Высокий», «Нормальный». Основываясь на них, система нечеткого вывода формирует количественную оценку условий работы оборудования (КОУР, *Operation Condition, OC*) в соответствии с за-

данными перечнями логических правил. Для фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения они приведены в табл. 1. Данные перечни правил являются эскизными и требуют уточнения при работе с оборудованием.

На основании полученной количественной оценки условий работы вычисляется количественная оценка технического состояния (КОТС, *Technical Condition, TC*). Для этого используется выражение:

$$TC(p) = 1 - \frac{1 - k \cdot OC(p)}{T_p}, \quad (1)$$

где  $TC(p)$  – количественная оценка технического состояния;  $OC(p)$  – количественная оценка условий работы;  $T$  – постоянная времени интегрирования;  $k$  – настроечный коэффициент;  $p$  – оператор Лапласа.

Для получения корректных результатов оценки технического состояния, коэффициент настройки и постоянная времени интегрирования должны быть определены экспертным путем с учетом особенностей и результатов экспериментальных исследований конкретного объекта диагностики. В рамках данной работы применяются тестовые значения. На основе полученных количественных оценок технического состояния может быть сформирована шкала с указанием необходимых мероприятий, к примеру: КОТС 1-0,7 – техническое обслуживание не требуется, КОТС 0,69-0,25 – техническое обслуживание необходимо провести в плановые сроки, КОТС 0,24-0 необходимо незамедлительное техническое обслуживание.

Формирование прогноза количественной оценки технического состояния осуществляется при помощи сети с долгой кратковременной памятью (*Long Short Term Memory network, LSTM*), которая является особым видом рекуррентной нейронной сети [12]. Сеть *LSTM* хорошо приспособлена для прогнозирования на основе данных временных рядов в случаях, когда важные события в них разделены временными задержками с неопределенной продолжительностью. Для построения сети с долгой кратковременной памятью в среде *Matlab* используется инструмент *Deep Network Designer*. Структура сети в рабочей области программы приводится на рис. 3.

Она включает в себя следующие элементы: входной слой, преобразующий входные данные в последовательность для обработки нейронной сетью, слой долгой кратковременной памяти, необходимый для анализа долгосрочных зависимостей в последовательности данных, исключающий слой, необходимый для исключения переобученности сети, полносвязный слой, перемножающий выходные сигналы предыдущего слоя и матрицы весов, и суммирующий с вектором смещения, а также слой регрессии, вычисляющий функцию потерь для оценки точности и качества работы системы. В результате обучения сети ошибка прогнозирования для тестового временного ряда, соответствующего диаграмме изменения количественной оценки

технического состояния длительностью один час, не превысила 6 %.

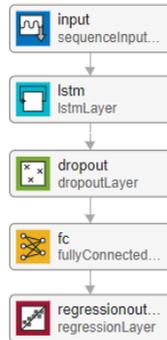
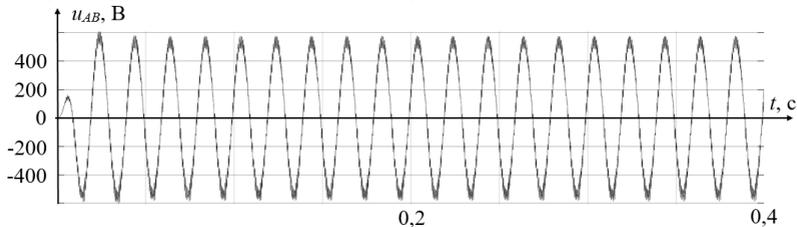


Рис. 3. Структурная схема сети с долгой кратковременной памятью

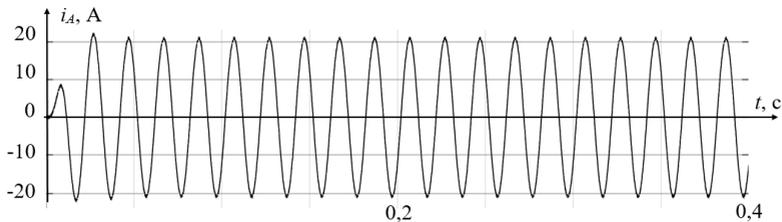
Fig. 3. Structural diagram of the LSTM network

### III. Результаты исследования

В процессе моделирования была рассмотрена работа системы в пределах нормального режима работы, при котором величины диагностических признаков не превышают нормальных значений, а также при ступенчатом увеличении электрической нагрузки сверх номинального значения.



(a)



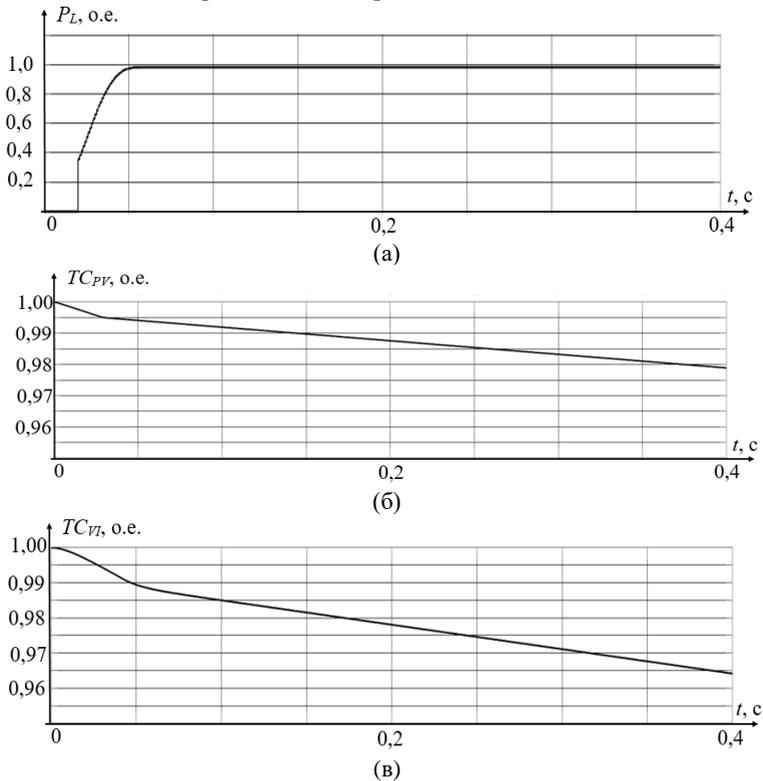
(б)

Рис. 4. Диаграммы нагрузки при работе солнечной электростанции в нормальном режиме: линейное напряжение нагрузки  $AB$  (а); ток фазы нагрузки (б)

Fig. 4. Load diagrams during normal operation of the solar power plant: linear load voltage  $AB$  (a); load current phase A (b)

На рис. 4 представлены диаграммы линейного напряжения нагрузки  $AB$ , тока фазы нагрузки  $A$  при работе солнечной электростанции в нормальном режиме с электрической мощностью нагрузки, равной 10 кВА с  $\cos\varphi 0,9$ . Действующее значение первой гармоники напряжения равно 381 В. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,8 А.  $THD$  (Total Harmonic Distortion) напряжения нагрузки составляет 1,3 %.

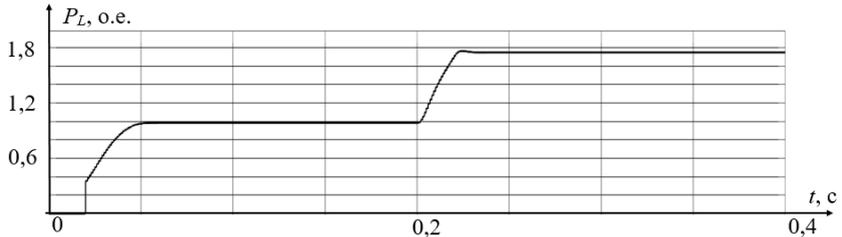
На рис. 5 приводятся графики изменения КОТС фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения, полученные при работе модели электростанции с номинальной величиной электрической нагрузки. Для большей наглядности графиков тестовый коэффициент изменения технического состояния в системе оценки был увеличен, так как моделирование выполняется на малом временном интервале.



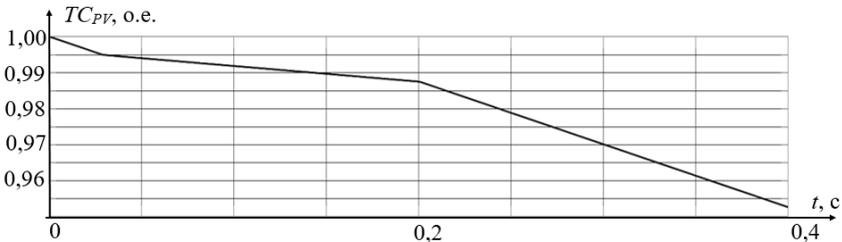
**Рис. 5. КОТС при номинальной нагрузке:**  
мощность нагрузки (а); КОТС фотоэлектрических преобразователей (б);  
КОТС инвертора напряжения (в)

**Fig. 5. TC at rated load power:**  
load power (a); TC of photovoltaic cells (b); TC of voltage converter (v)

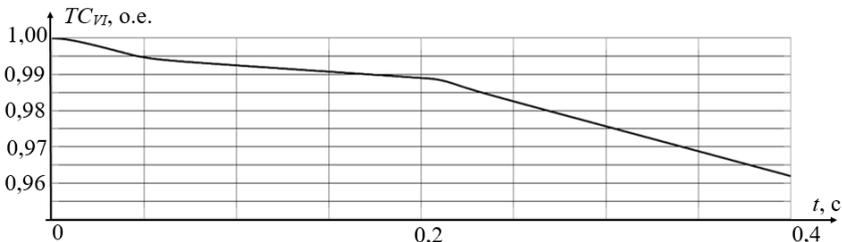
Рассмотрим изменение КОТС оборудования при увеличении мощности нагрузки до 175 % от номинального значения в результате подключения второго блока нагрузки в момент 0,2 с (рис. 6).



(а)



(б)



(в)

**Рис. 6. КОТС при увеличении мощности нагрузки:**

*мощность нагрузки (а); КОТС фотоэлектрических преобразователей (б); КОТС инвертора напряжения (в)*

**Fig. 6. TC with increasing load power:**

*load electrical power (a); TC of photovoltaic cells (b); TC of voltage converter (в)*

Можно отметить, что с момента времени 0,2 с КОТС уменьшаются интенсивнее, чем на рис. 5, что вызвано выходом диагностических признаков оборудования за пределы нормального режима. Функционирование систем КОТС оборудования соответствует ожидаемому.

Рассмотрим работу системы прогнозирования КОТС оборудования на примере графиков оценок технического состояния, полученных в результате моделирования работы оборудования длительностью один час, с горизонтом прогнозирования, равным 500 с, и со ступенчатым увеличением электрической мощности нагрузки до 175 % от номинальной величины в момент времени 2 000 с. На рис. 7 представлены графики КОТС фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения, сплошной линией показана оценка, полученная в результате имитационного моделирования, пунктирной линией показана спрогнозированная оценка. Наличие пробелов в начальных отрезках графиков прогноза объясняется тем, что точки графика на интервале от 0 до 185 с используются для инициализации нейронной сети, и прогнозирование на данном интервале не осуществляется. В рассматриваемом случае ошибка прогнозирования не превысила 5 %.

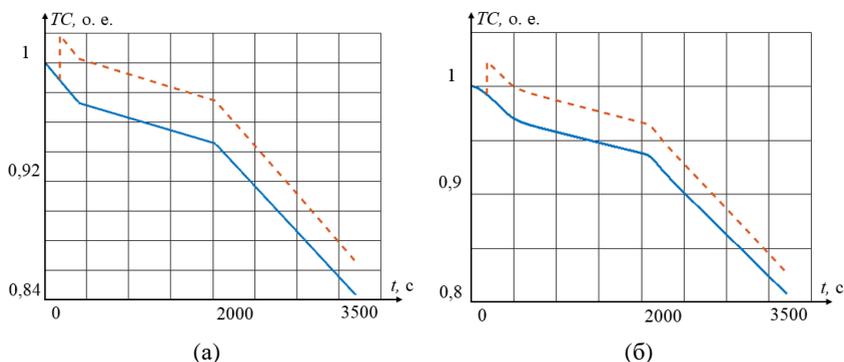


Рис. 7. Прогнозирование КОТС: фотоэлектрических преобразователей (а); инвертора напряжения (б)

Fig. 7. TC forecasting: photovoltaic cells (a); voltage converter (b)

#### IV. Заключение

В статье приводятся результаты разработки системы количественной оценки технического состояния солнечной электростанции малой мощности. Проведено моделирование работы системы в *Matlab Simulink*. Получены графики КОТС оборудования при работе с номинальной мощностью нагрузки, а также при увеличении мощности нагрузки до 175 % от номинального значения. Получены прогнозы КОТС оборудования для графиков, длительностью один час, в рассматриваемом примере ошибка прогнозирования не превысила 5 %. Разработанная модель может быть использована при построении систем мониторинга электротехнического оборудования с целью предотвращения внезапных отказов и оказания помощи в принятии решений о проведении технического обслуживания и ремонта.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).*

© Кочеганов Д.М., 2023

© Серебряков А.В., 2023

© Стеклов А.С., 2023

*Поступила в редакцию 01.03.2023*

*Принято к публикации 23.03.2023*

*Received 01.03.2023*

*Accepted 23.03.2023*

### Библиографический список

- [1] Yang C., Liu J., Zeng Y., Xie G. Real-time condition monitoring and fault detection of components based on machine-learning reconstruction model // *Renewable Energy*. 2019. № 133. P. 433-441. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.062
- [2] Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. 106908.
- [3] Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26 июля 2017 г. № 676. Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. [Электронная ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003> (дата обращения 01.02.2023).
- [4] Назарычев А.Н., Новомлинский Э.В., Андреев Д.А. Оценка технического состояния электрооборудования на основе расчетов интегральных показателей // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики*, Июль 04-09, 2016, Сыктывкар, Россия: ООО «Коми республиканская типография», 2016. С. 171-179.
- [5] Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Совершенствование методики определения индекса технического состояния электрооборудования // 91-е заседание Межд. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Сентябрь 23-27, 2019, Ташкент, Узбекистан: ИСЭМ СО РАН, 2019. С. 316-326.
- [6] Оклей П.И. Методика оценки интегрального технического состояния оборудования тепловых электростанций // *Транспортное Дело России*. 2015. № 6. С. 72-76.
- [7] Давиденко И.В. Индекс технического состояния: улучшение методики расчета на основе опыта работы ЭДИС «Альбатрос» // XXIII Межд. науч.-тех. и практ. конф. «Силовые и распределительные трансформаторы. Реакторы. Системы диагностики», Июнь 21-22, 2016, Москва, Россия. М.: Международная Ассоциация «ТРАВЭК», 2016.
- [8] Попов Г.В., Игнатьев Е.Б. Определение индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации // *Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета*. 2014. № 4. С. 25-32.

- [9] Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning - I // *Information Sciences*. 1975. № 8 (3). P. 199-249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5
- [10] Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning - II // *Information Sciences*. 1975. № 8 (4). P. 301-357. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90046-8
- [11] Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – III // *Information Sciences*. 1975. № 9 (1). P. 43-80. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90017-1
- [12] Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // *Neural Computation*. 1997. № 9 (8). P. 1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735

### References

- [1] C. Yang, J. Liu, Y. Zeng and G. Xie, “Real-time condition monitoring and fault detection of components based on machine-learning reconstruction model”, *Renewable Energy*, no. 133, pp. 433-441, Apr. 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.062
- [2] P. Gangsar and R. Tiwari, “Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 144, 106908, Oct. 2020.
- [3] Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017 No. 676 “Ob utverzhdenii metodiki ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i linij elektroperedachi elektricheskikh stancij i elektricheskikh setej [On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and transmission lines of power plants and electrical networks]”. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003> [Accessed: Feb. 1, 2023] (in Russian).
- [4] A.N. Nazarychev, E.V. Novomlinskij and D.A. Andreev, “Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya na osnove raschetov integral'nyh pokazatelej [Assessment of the technical condition of electrical equipment based on calculations of integral indicators]”, in proc. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki [Methodical issues of researching the reliability of large energy systems]*, July 04-09, 2016, Syktyvkar, Russia, pp. 171-179 (in Russian).
- [5] A.N. Nazarychev and D.A. Andreev, “Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya [Improving the methodology for determining the index of the technical condition of electrical equipment]”, in proc. *91st meeting of the International. scientific seminar n.a. Yu.N. Rudenko “Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki [Methodological issues of researching the reliability of large energy systems]”*, September 23-27, 2019, Tashkent, Uzbekistan, pp. 316-326 (in Russian).
- [6] P.I. Okley, “Methodology to evaluate the integral technical state of equipment for thermal power stations”, *Transport Business in Russia*, no. 6, pp. 72-76, 2015.
- [7] I.V. Davidenko, “Health Index: improved calculation method, based on experience of EDIS “Albatross””, in proc. *XXIII Int. sci.-tech. and pract. conf. “Silovye i raspredelitel'nye transformatory. Reaktory. Sistemy diagnostiki [Power and distribution transformers. Reactors. Diagnostic systems]”*, June 21-22, 2016, Moscow, Russia (in Russian).

- [8] G.V. Popov and E.B. Ignatiev, "Calculation of technical condition index of power transformers in operation", *Vestnik IGEU*, no. 4, pp. 25-32, 2014 (in Russian).
- [9] L.A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I", *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199-249, 1975. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5
- [10] L.A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – II", *Information Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 301-357, 1975.
- [11] L.A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – III", *Information Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 43-80, 1975.
- [12] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory", *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 1997. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Кочеганов Дамир Михайлович**, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Damir M. Kocheganov**, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Серебряков Артем Владимирович**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Artyom V. Serebryakov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Стеклов Алексей Сергеевич**, кандидат технических наук, инженер-проектировщик АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Aleksei S. Steklov**, Cand. Sci. (Eng.), design engineer of JSC «OKBM Afrikantov», Nizhny Novgorod, Russian Federation