

# Оценка технического состояния оборудования тепловой станции на примере конденсатора

И.А. Щербатов, А.Н. Долгушев, М.К. Белов, В.А. Агибалов, И.В. Салов

**Аннотация** — Ввиду появления различных технических способов сбора и обработки данных, связанных, в первую очередь, со стремительным прогрессом в сфере телекоммуникационных технологий и технологий Интернета вещей, стало возможным ставить и решать совершенно новые прикладные задачи, такие как предиктивная диагностика и обслуживание — диагностика и обслуживание оборудования на основе предиктивной аналитики и автоматического контроля состояния оборудования.

Математическое моделирование сложных систем управления и одиночных технологических объектов является, как правило, единственным объективным методом для принятия обоснованных технических решений при проектировании и эксплуатации оборудования для прогнозирования свойств этого оборудования. Развиваемые в настоящее время механизмы математического моделирования служат научной основой интеллектуальных систем поддержки принятия инженерных решений. В статье рассматривается разработка индекса технического состояния для оценки технического состояния оборудования тепловой электростанции (ТЭС). Разработана математическая модель конденсатора. Проведён анализ ключевых параметров для оценки технического состояния оборудования. Приведён поэтапный детальный расчет индекса, обеспечивающего оценку технического состояния оборудования. Приведён пример расчёта технического состояния для конденсатора. Полученные при решении поставленной задачи математическая модель и алгоритмы могут быть в дальнейшем использованы в ряде прикладных проектов.

**Ключевые слова**— диагностика, энергетическое оборудование, ТЭС, техническое состояние, конденсатор, индекс технического состояния, математическая модель.

Статья получена 24 декабря 2022.

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения построения имитационных моделей двойников оборудования ТЭС и тепловых схем для применения в составе систем диагностики и предиктивной аналитики» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программ научных исследований «Энергетика», «Электроника, радиотехника и ИТ» и «Технологии индустрии 4.0 для промышленности и робототехники» в 2020-2022 гг.

И.А. Щербатов, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (e-mail: ShcherbatovIA@mpei.ru).

А.Н. Долгушев, НИУ «МЭИ» (e-mail: DolgushevAN@mpei.ru).

М.К. Белов, НИУ «МЭИ» (e-mail: BelovMK@mpei.ru).

В.А. Агибалов, НИУ «МЭИ» (e-mail: AgibalovVA@mpei.ru).

И.В. Салов, НИУ «МЭИ» (e-mail: SalovIV@mpei.ru).

## I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных факторов эффективной эксплуатации любого объекта энергетики является безотказная работа его оборудования. Для поддержания работоспособности оборудования проводятся планово-предупредительные ремонты (ППР) [1]. На основе ППР строится стратегия эксплуатации всего объекта: покупаются запасные части, инструменты и принадлежности, создаётся резерв оборудования (холодный, горячий и т.п.), разрабатывается финансовый план и т.д. Но при этом ППР не исключает возможности выхода из строя оборудования. В большинстве случаев, отказ нивелируется вводом резервного оборудования, но всегда существует опасность, что резерв может выйти из строя. Последствия данного события могут варьироваться от финансовых потерь из-за ремонтов и недовыработки электроэнергии или тепла до аварии. Поэтому одним из ключевых трендов последнего десятилетия является внедрение стратегии ремонта энергетического оборудования по его фактическому состоянию [2]. Ключевой задачей при этом является оценка актуального технического состояния оборудования без вывода его из эксплуатации.

Для решения данной задачи строятся модели оборудования, которые воспроизводят необходимые свойства объекта с требуемой точностью. Так в статье [3] разработана модель динамических режимов работы силового трансформатора, сочетающая достаточную для указанных целей вычислительную точность с высокой скоростью вычислений, что позволяет использовать модель для исследовательских целей в режиме имитационного эксперимента в реальном времени. В статье [4] описана концепция построения цифрового двойника распределенной генерации электроэнергии на основе неявнополюсного синхронного генератора.

Необходимо отметить, что не каждая модель подходит для диагностики оборудования, поэтому иногда приходится создавать модели, которые можно использовать только для оценки технического состояния оборудования. Например, в работе [5] определяется оптимальная модель машинного обучения, проводится ее сравнение с существующими и делается вывод о целесообразности использования в системе

предиктивной аналитики. Для оценки технического состояния конкретных единиц оборудования разрабатываются соответствующие метрики, которые используются в системах управления ремонтами [6]. Используются комбинированные методики [7], объединяющие математический аппарат на основе синтеза нечетких лингвистических переменных и количественных характеристик диагностируемого оборудования [8]. В статье [9] рассмотрены различные методики диагностики: анализ тенденции изменения характеристик, анализ конструкции, составление модели дефектов, и диагностические характеристики: вибрационные характеристики, абсорбционные характеристики, тепловизионные характеристики и т.д. В настоящее время разрабатываются специальные программы, которые направлены на решение задачи оценки технического состояния оборудования, например, для автоматического расчета показателя технического состояния котлоагрегатов [10].

Определение технического состояния оборудования - это только часть решения проблемы его выхода из строя, так как определив состояние, можно обнаружить, что оборудование находится в критическом состоянии и его необходимо выводить из эксплуатации в ближайшее время, что не всегда возможно из-за особенностей технологического процесса. По этой причине необходимо создавать систему прогнозирования, которая обеспечит предсказание момента времени возникновения конкретного дефекта или выхода оборудования из строя. Решению данной задачи посвящена работа [11], в которой описана архитектура системы предиктивной аналитики объектов энергетики. Рассмотрены методы предварительной обработки больших данных и прогнозирования значений параметров. Показана эффективность искусственных нейронных сетей в решении этих задач. В статье [12] представлены основания для выбора обучающей и тестовой выборки для разрабатываемой нейронной сети, проведена оценка адекватности модели нейронной сети и показано, как модель может быть использована для прогнозирования отказов оборудования. Проведены моделирующие эксперименты с использованием ЭВМ и ретроспективные выборки фактических значений для предприятий энергетического машиностроения. Доказана работоспособность разработанной модели для различных типов технологического оборудования. В статье [12] разработана адаптивная система прогнозирования надёжности технологического оборудования, в основу которой положена нейросетевая модель, состоящая из трех подсистем – мониторинга, адаптации и прогнозирования. Одной из важных подзадач прогнозирования технического состояния на основе значений и трендов технологических параметров является предварительная обработка данных [13]. Существуют работы, в которых решается задача, сопряженная с оценкой технического состояния – прогнозирование остаточного ресурса [14].

Наиболее перспективный способ оценки актуального технического состояния единицы энергетического оборудования является построение функциональной зависимости, обеспечивающей расчет относительной величины, характеризующей техническое состояние на основе значений технологических параметров в режиме реального времени.

## II. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ЕДИНИЦЫ ОБОРУДОВАНИЯ

В работе рассматривается конденсатор, входные и выходные переменные которого представлены на рисунке 1, расчетные зависимости для модели приведены в [15].

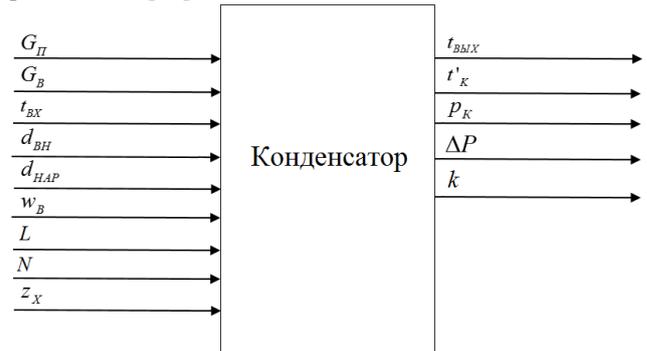


Рис. 1. Обобщенная структурная схема конденсатора сжигания газообразного топлива:

Входные переменные математической модели (ММ):

$G_n$  – расход пара в конденсаторе;  $G_B$  – расход охлаждающей воды;  $t_{BX}$  – температура воды на входе в конденсатор;  $d_{BH}$  – внутренний диаметр трубок;  $d_{HAP}$  – наружный диаметр трубок;  $w_B$  – скорость воды в трубках;  $z_x$  – число ходов;  $L$  – длина трубок;  $N$  – количество трубок.

Выходными переменные:  $t_{ВЫХ}$  – температура воды на выходе из конденсатора;  $t'_K$  – температура насыщения в конденсаторе;  $P_K$  – давление насыщения в конденсаторе;  $\Delta P$  – падение напора по водяному тракту аппарата.

Для оценки работоспособности данной модели нецелесообразно применять статистические методы оценки адекватности (оценка на основе критерия Фишера), так как на данный момент времени отсутствует множество данных требуемого размера, полученное с пуско-наладочных работ оборудования, а при малом количестве данных получаются слишком большие интервалы допустимых значений, что не подходит для целей построения модели.

Поэтому для проверки работоспособности модели использовалась относительная погрешность расчета на основе реальных данных функционирования конденсатора К-33160 на пуско-наладочных работах. Эти данные обеспечат наилучшую оценку точности ММ, так как конденсатор ещё не успел получить множество дефектов и засориться (таблица 1).

Как видно из таблицы, погрешность результатов расчёта ММ не превосходит 1,5%, что свидетельствует о ее работоспособности.

### III. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Для оценки технического состояния единицы оборудования необходимо иметь изменяемые

параметры, рассчитываемые по модели (таблица 1), а также параметры, которые измеряются непосредственно на объекте, например, химические параметры конденсата.

Таблица 1. Сравнение данных

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Расчетные значения	Значения из документа	Относительная погрешность, %
Температура воды на выходе из конденсатора	$t_{\text{ВЫЛХ}}$	$^{\circ}\text{C}$	26,717	26,4	1,187
Истинный коэффициент теплопередачи	$k_{\text{ст}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	3408,1 3119 (1 итерация)	3410	0,056
Температура насыщения в конденсаторе	$t'_{\text{К}}$	$^{\circ}\text{C}$	28,96	29,1	0,483
Давление насыщения в конденсаторе	$p_{\text{К}}$	$\text{кПа}$	4,0006	4	0,015
Падение давления по водяному тракту	$\Delta P$	$\text{Па}$	86786	85700	1,251

Учет химических показателей воды для оценки технического состояния оборудования описывается в [16] при создании экспертной системы, позволяющей количественно прогнозировать вклад различных показателей в надежность работы ТЭС или АЭС в целом.

Также это подтверждается в работе [17], где рассматривается применение метода оценки технического состояния конденсатора по текущим значениям химических параметров оборудования от измерительных приборов, установленных на выход конденсатора. Поэтому выбраны следующие параметры для оценки: кислородосодержание, pH и электропроводимость конденсата.

Таким образом, множество параметров, которые могут использоваться для оценки технического состояния оборудования включает: температуру воды на выходе из конденсатора, коэффициент теплопередачи, температуру насыщения в конденсаторе, падение давления по водяному тракту аппарата, водородный показатель конденсата, электропроводимость конденсата, кислородосодержание в конденсате.

Оценка технического состояния производится на основе сравнения параметров реального объекта и его модели. При этом ряд параметров объекта получить сложнее. Например, температура воды на выходе из конденсатора измеряется с использованием прибора, как и водородный показатель, показатели электропроводимости, и кислородосодержания в воде. Температура насыщения в конденсаторе измеряется метрологическим прибором, но этот же параметр в виде температуры конденсации является принимаемой величиной в итерационном расчёте. Падение напора по водяному тракту определяется на основе разницы давлений на входе и выходе водяного тракта. Важным параметром, который необходимо рассчитать, является коэффициент теплопередачи.

После этого необходимо создать метрику сравнения данных параметров. Здесь возникают некоторые

сложности, обусловленные тем, что часть параметров нормируется в нормативно-технической документации (например, химические показатели, для которых может быть использована методика, описанная в [18], а значит, для них имеются предельно допустимые и нормальные значения, которые используются в качестве реперных точек).

Другие показатели, такие как разница коэффициентов теплопередачи, разница падений напора и разница давлений, не имеют регламентов расчетов. Поэтому для таких параметров необходимо использовать опыт экспертов.

Для сравнения величин измеряемых и вычисляемых параметров составлена таблица 2. Результатом сравнения величин должна стать шкала с диапазоном от 0 до 100, где 100 – всё хорошо, 0 – критически плохо. За оценку сравнения выберем относительную погрешность:

$$\delta m_{\text{par}} = \frac{|m_{\text{РЕАЛ}} - m_{\text{ЦФ}}|}{m_{\text{ЦФ}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $m_{\text{РЕАЛ}}$  – измеренное значение;  $m_{\text{ЦФ}}$  – значение, рассчитанное по модели.

Таблица 2. Оценка разницы параметров

Наименование параметра	Значение оценки	
	0	100
Относительная погрешность температуры воды на выходе из конденсатора	> 10 %	< 1,5%
Относительная погрешность коэффициента теплопередачи	> 10 %	< 3%
Относительная погрешность температуры насыщения в конденсаторе	> 3 %	< 0,1%
Относительная погрешность падение давления по водяному тракту аппарата	> 20 %	< 3%

Промежуточное значение между 0 и 100 рассчитываются с помощью линейной функции. Например, реперными для относительной погрешности температуры воды на выходе из конденсатора являются точки (0; 20%) и (100; 3%). Таким образом, при расхождении в 11,5% оценка будет составлять 50.

Рассмотрим методику, которая описана в источнике [10]. Эффективным, с точки зрения автоматизации расчетов и легкости интерпретации, подходом к определению индекса технического состояния оборудования является подход, основанный на определении степени отклонения текущих значений технологических параметров, характеризующих техническое состояние оборудования от значений данных параметров, соответствующих предупредительным сигнализациям:

$$HI_t = \begin{cases} \frac{y_t - y_{min}}{y_{mean} - \Delta y - y_{min}} \text{ if } |y_t - y_{min}| < |y_{max} - y_t| \\ \frac{y_{max} - y_t}{y_{max} - y_{mean} - \Delta y} \text{ if } |y_{max} - y_t| < |y_t - y_{min}| \end{cases} \quad (2)$$

где  $HI_t \in [0,1]$  – значение индекса технического состояния (индекса здоровья – Health Index [15]) для данного технологического параметра в каждый момент времени;  $y_t$  – значение технологического параметра, характеризующего техническое состояние системы, в каждый момент времени  $t$ ;  $y_{min}$ ,  $y_{max}$  – минимальное и максимальное значения технологического параметра  $y_t$ , соответствующие уровню предупредительной сигнализации;  $y_{mean} = \frac{y_{max} - y_{min}}{2}$  – среднее значение технологического параметра, идеальное по отношению к уровням предупредительной сигнализации,  $\Delta y = \delta \times y_{mean}$  – процентное отклонение от среднего значения  $y_{mean}$ .

Значение индекса технического состояния для группы технологических параметров, описывающего состояние всей системы определяется, как среднее гармоническое от всех «индивидуальных» индексов технического состояния:

$$HI_t = Z_{par} = \frac{N}{\frac{1}{HI_1} + \dots + \frac{1}{HI_N}} \cdot 100 \quad (3)$$

Оценив все параметры необходимо объединить их в одну итоговую оценку технического состояния оборудования, в данной работе используется индекс технического состояния оборудования, который будет рассчитываться следующим образом:

$$ИТС = \sum_i (w_i \cdot Z_{par}) \quad (4)$$

где  $w_i$  — значение весового коэффициента для  $i$ -го параметра;  $Z_{par}$  — значение оценки  $i$ -го параметра.

Таблица 4. Рассчитанная оценка

Наименование параметра	Данные с оборудования	Цифровая модель	Относительная погрешность, %	Оценка
------------------------	-----------------------	-----------------	------------------------------	--------

Весовые коэффициенты будут формироваться на основе экспертной оценки (таблица 3).

Таблица 3. Весовые коэффициенты

Параметр оценивания	Весовой коэффициент
Температура воды на выходе из конденсатора	0,17
Истинный коэффициент теплопередачи	0,23
Температура насыщения в конденсаторе	0,24
Падение давления по водяному тракту аппарата	0,09
Водородный показатель	0,27
Электропроводимость воды	
Кислородосодержание в воде	

#### IV. ПРИМЕР РАСЧЕТА ИНДЕКСА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Рассмотрим пример расчёта индекса технического состояния конденсатора.

Данные, измеренные на реальном работающем оборудовании и рассчитанные данные по модели сведём в таблицу 4 и рассчитаем индивидуальную оценку каждого параметра.

Для химических параметров воды расчёт проводится другим способом, пример показан в формуле (5), получены результаты расчётов приведены в таблице 5. Приведем пример расчёта индивидуальной оценки содержания кислорода в воде:

$$HI_t = \frac{20 - 12,3}{20 - \frac{20 - 10}{2} - \frac{12,3 - \frac{20 - 10}{2}}{12,3} \cdot \frac{20 - 10}{2}} = 0,64 \quad (5)$$

Таблица 5. Рассчитанная оценка химических показателей воды

Наименование параметра	Значение	Индивидуальная оценка	Общая оценка
Кислородосодержание в воде	12,3	0,64	26,89
Электропроводимость воды	0,7	0,84	
Водородный показатель	7,6	0,119	

Температура воды на выходе из конденсатора	28,74	27,8	3,381	77,871
Коэффициента теплопередачи	3880,1	3723,6	4,203	82,814
Температура насыщения в конденсаторе	29,1	28,9	0,692	100
Падение давления по водяному тракту аппарата	103854	92678	12,059	46,712

Теперь рассчитаем итоговую оценку:

$$ИТС = 0,17 \cdot 77,871 + 0,23 \cdot 82,814 + 0,24 \cdot 100 + 0,09 \cdot 46,712 + 0,27 \cdot 26,89 = 61,58 \quad (6)$$

По полученным результатам, можно утверждать, что необходим усиленный контроль технического состояния конденсатора и устранение в ближайший ППР неисправностей всех изношенных элементов, восстановление или замена их.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования была создана математическая модель конденсатора, погрешность расчетов по которой не превышает 1,5%. Также разработана методика оценки технического состояния конденсатора, которая позволяет оценивать техническое состояние не выводя оборудование из эксплуатации. Дальнейшие исследования будут посвящены разработке методики прогнозирования технического состояния оборудования, а также построению математических моделей другого оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования. Справочник. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2017. 504 с.
- [2] Проталинский О.М., Андришин А.В., Щербатов И.А., Проталинский И.О. Система идентификации дефектов технологического оборудования объектов энергетики // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. № 5 (115). С. 56-63.
- [3] Тихонов А. и др. Разработка технологии создания цифровых двойников силовых трансформаторов на основе цепных моделей и 2D-моделей магнитного поля // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 1. – С. 76-82.
- [4] Булатов Ю. Н., Крюков А. В. Алгоритмы построения цифрового двойника установки распределенной генерации // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2020. – Т. 13. – №. 6. – С. 677- 689. DOI: 10.17516/1999-494X-0256.
- [5] Shcherbatov I. A., Turikov G. N. Determination of power engineering equipment's defects in predictive analytic system using machine learning algorithms // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1683. – №. 4. – Р. 042056.
- [6] Щербатов И.А. Интеллектуализация информационных систем управления ремонтами предприятий энергетики // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2019. №3 (63).
- [7] Манусов В.З., Токаренко Е.А. Диагностика технического состояния трансформаторного оборудования на основе нечетких моделей // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – №. 1-2. – С. 269-272.
- [8] Кунцевич М.В. Диагностика трансформаторов // Наука и техника Казахстана. – 2010. – №. 4. – С. 50-55.
- [9] Plotnikova L. et al. Digitalizing the Process of Tracking Technical Condition of the Main Equipment of Energy Providing Enterprises // SHS Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Т. 93.

- [10] Arakelian, E., Pashchenko, A., Shcherbatov, I., Tsurikov, G., & Titov, F. Creation of Predictive Analytics System for Power Energy Objects // 2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development"(MLSD). – IEEE, 2019. – С. 1-5.
- [11] Protalinsky O.M., Shcherbatov I.A., Stepanov P.V. Identification of the actual state and entity availability forecasting in power engineering using neural-network technologies // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Т. 891. – №. 1. – С. 012289.
- [12] Проталинский, О.М., Щербатов, И.А., Ханова, А.А., Проталинский, И.О. Адаптивная система прогнозирования надежности технологического оборудования объектов энергетики // Информатика и системы управления. – 2019. – №. 1. – С. 93-105.
- [13] Andryushin, A., Shcherbatov, I., Dolbikova, N., Kuznetsova, A., Tsurikov, G.. Outlier detection in predictive analytics for energy equipment // Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. – Springer, Cham, 2020. – С. 193-203.
- [14] Молчанов М.В. и др. Прогнозирование остаточного срока службы силовых масляных трансформаторов на основании данных мониторинга // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – №. 9. – С. 518-526.
- [15] Agibalov V. et al. Building a digital capacitor model for diagnostic and predictive analytics applications // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – Т. 2402. – №. 1. – С. 040034.
- [16] Воронов В Н., Петрова Т.И. Водно-химические режимы ТЭС и АЭС. – 2011. 240 с.
- [17] Sultanov M. M. et al. Assessment of technical condition of condensers of TPP steam turbines according to the data of the power equipment parameters monitoring system // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2021. – С. 1-4.
- [18] Приложение Plantweb™ Health Advisor. Лист технических данных продукта. Июнь 2019. URL: <https://www.emerson.ru/documents/automation/%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-plantweb-health-advisor-ru-ru-5258880.pdf>

# Thermal plant equipment technical condition assessment on the example of a condenser

I.A. Shcherbatov, A.N. Dolgushev, M.K. Belov, V.A. Agibalov, I.V. Salov

**Abstract**— Due to the emergence of various technical methods for collecting and processing data, primarily related to the rapid progress in the field of telecommunications technologies and Internet of things technologies, it has become possible to set and solve completely new applied tasks, such as predictive diagnostics and maintenance - diagnostics and maintenance of equipment on based on predictive analytics and automatic monitoring of equipment status.

Mathematical modeling of complex control systems and single technological objects is, as a rule, the only objective method for making sound technical decisions in the design and operation of equipment to predict the properties of this equipment. The mechanisms of mathematical modeling currently being developed serve as the scientific basis for intelligent engineering decision support systems. The article discusses the development of a technical condition index for assessing the technical condition of the equipment of a thermal power plant (CHP). A mathematical model of a capacitor has been developed. An analysis of key parameters was carried out to assess the technical condition of the equipment. A step-by-step detailed calculation of the index, which provides an assessment of the technical condition of the equipment, is given. An example of calculating the technical condition for a capacitor is given. The mathematical model and algorithms obtained by solving the problem can be further used in a number of applied projects.

**Keywords**— diagnostics, power equipment, CHP, technical condition, capacitor, technical condition index, mathematical model

## REFERENCES

- [1] Yashura A.I. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta energeticheskogo oborudovaniya. Spravochnik. [System of maintenance and repair of power equipment. Handbook] – M.: Izd-vo NTs ENAS [M.: Publishing House “NTs ENAS”], 2017. 504 p.
- [2] Protalinsky O.M., Andryushin A.V., Shcherbatov I.A., Protalinsky I.O. Sistema identifikatsii defektov tekhnologicheskogo oborudovaniya obyektov energetiki [System for detecting defects in technological equipment of energy facilities] // Energoberezheniye i vodopodgotovka [Energy saving and water treatment]. 2018. No. 5 (115). p. 56-63.
- [3] Tikhonov A. et al. Razrabotka tekhnologii sozdaniya tsifrovyykh dvoynikov silovykh transformatorov na osnove tsepykh modeley i 2D-modeley magnitnogo polya [Development of technologies for creating digital twins of power transformers based on chain models and 2D models of the magnetic field] // Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik [South Siberian Scientific Bulletin]. – 2020. – No. 1. - p. 76-82.
- [4] Bulatov Yu. N., Kryukov AV. Algoritmy postroyeniya tsifrovogo dvoynika ustanovki raspredelennoy generatsii [Algorithms for constructing a standard dual installation of distributed generation] // Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii [Journal of the Siberian Federal University. Technics and technology]. – 2020. - Vol. 13. - No. 6. - p. 677-689.
- [5] Shcherbatov I. A., Turikov G. N. Determination of power engineering equipment’s defects in predictive analytic system using machine learning algorithms //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1683. – №. 4. – P. 042056.
- [6] Shcherbatov I.A. Intellektualizatsiya informatsionnykh sistem upravleniya remontami predpriyatiy energeticheskoy [Intellectualization of information systems for repair management of energy enterprises] // Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2019. No. 3 (63).
- [7] Manusov V.Z., Tokarenko E.A. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya transformatornogo oborudovaniya na osnove nechetkikh modeley [Diagnostics of the technical condition of transformer equipment based on fuzzy models] // Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East]. – 2014. – No. 1-2. - p. 269-272.
- [8] Kuntsevich M.V. Diagnostika transformatorov [Diagnostics of transformers] // Nauka i tekhnika Kazakhstana [Science and technology of Kazakhstan]. – 2010. – No. 4. - p. 50-55.
- [9] Plotnikova L. et al. Digitalizing the Process of Tracking Technical Condition of the Main Equipment of Energy Providing Enterprises //SHS Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Vol. 93.
- [10] Arakelian, E., Pashchenko, A., Shcherbatov, I., Tsurikov, G., & Titov, F. Creation of Predictive Analytics System for Power Energy Objects //2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development"(MLSD). – IEEE, 2019. – p. 1-5.
- [11] Protalinsky O.M., Shcherbatov I.A., Stepanov P.V. Identification of the actual state and entity availability forecasting in power engineering using neural-network technologies //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2017. – Vol. 891. – №. 1. – P. 012289.
- [12] Protalinsky O.M., Shcherbatov I.A., Khanova A.A., Protalinsky I.O. Adaptivnaya sistema prognozirovaniya nadezhnosti tekhnologicheskogo oborudovaniya obyektov energetiki [An adaptive system for predicting the reliability of technological equipment for energy facilities]. Informatika i sistemy upravleniya [Informatics and control systems]. – 2019. – No. 1. - p. 93-105.
- [13] Andryushin, A., Shcherbatov, I., Dolbikova, N., Kuznetsova, A., Tsurikov, G.. Outlier detection in predictive analytics for energy equipment //Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. – Springer, Cham, 2020. – p. 193-203.
- [14] Molchanov M.V. et al. Prognozirovaniye ostatochnogo sroka sluzhby silovykh maslyanykh transformatorov na osnovanii dannykh monitoring [Predicting the residual service life of power oil transformers based on monitoring data] // Izvestiya Tulsckogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. [News of the Tula State University. Technical science]. – 2021. – No. 9. - p. 518-526.
- [15] Agibalov V. et al. Building a digital capacitor model for diagnostic and predictive analytics applications //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – Vol. 2402. – №. 1. – P. 040034.

- [16] Voronov V.N., Petrova T.I. Vodno-khimicheskiye rezhimy TES i AES [Water-chemical modes of thermal power plants and nuclear power plants]. – 2011. 240 p.
- [17] Sultanov M. M. et al. Assessment of technical condition of condensers of TPP steam turbines according to the data of the power equipment parameters monitoring system //2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2021. – C. 1-4.
- [18] Plantweb™ Health Advisor App. Product data sheet. June 2019. URL: <https://www.emerson.ru/documents/automation/%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-plantweb-health-advisor-ru-ru-5258880.pdf>