



УДК 621.311:519.72

© 2016 г. **Н.И. Хорошев**, канд. техн. наук,  
**Д.К. Елтышев**, канд. техн. наук  
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В работе рассмотрен метод оценки и прогнозирования технического состояния оборудования электротехнических комплексов на основе формализованного алгоритма интегральной оценки как инструмента поддержки принятия решений при обслуживании и ремонте ответственных объектов в условиях неопределенности.

**Ключевые слова:** интегральная оценка, прогнозирование, принятие решений, нечеткая логика, база знаний.

DOI: 10.22250/isu.2016.50.58-68

### Введение

Устойчивое и безаварийное функционирование современных производственных объектов и технологических процессов различных отраслей промышленности, систем энергообеспечения муниципальных организаций и жилого сектора зависит от надежной работы электротехнических комплексов, выполняющих задачи генерации, преобразования и передачи электроэнергии. Электротехнический комплекс (ЭТК) представляет собой сложную систему, структура которой определяется назначением и особенностями выполняемых ей функций и составом различного электротехнического оборудования (силовые и измерительные трансформаторы, электрические машины, коммутационная аппаратура и др.) [1, 2]. Существенное влияние на эффективность функционирования ЭТК оказывает наличие информационной инфраструктуры, позволяющей оперативно получать достоверные данные о состоянии оборудования и его подсистем и своевременно планировать проведение ремонтно-эксплуатационных мероприятий. В условиях повышенного износа оборудования ЭТК для снижения числа аварийных ситуаций, ущерба от простоя технологических установок и различных техногенных рисков необходимо не только проводить мониторинг параметров оборудования, но и качественно оценивать его работоспособность, диагностировать наличие дефектов и степень их критичности, а также определять моменты возможного вы-

хода оборудования из строя. Решение данных задач требует наличия определенной методологии оценки и прогнозирования технического состояния (ТС) оборудования, позволяющей инженерно-техническому персоналу принимать обоснованные решения по управлению обслуживанием и ремонтом ЭТК [1 – 6].

### Постановка цели и задач исследования

Цель данного исследования заключается в разработке механизма достоверной интегральной оценки текущего и перспективного технического состояния оборудования электротехнических комплексов с учетом разнородной информации о его функционировании. Данная цель предполагает необходимость разработки методики интегральной оценки ТС рассматриваемых энергетических объектов и ее исследование на примере типовых элементов ЭТК.

Задача оценки технического состояния оборудования ЭТК может быть представлена как задача формализации причинно-следственных связей между значениями его ключевых технических параметров (диагностических признаков) и фактами наличия дефектов в отдельных его подсистемах, узлах и агрегатах [3, 4, 7]:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow Y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}, \quad (1)$$

где  $x_i$  –  $i$ -й информативный параметр, связанный с ТС оборудования;  $Y$  – величина, определяющая уровень фактической работоспособности оборудования с учетом критичности имеющихся в нем дефектов; « $\rightarrow$ » – способ формализации диагностической функции.

Комплексный параметр ТС  $Y$  должен позволять оценить эффективность работы оборудования в целом, а также его отдельных элементов (систем, подсистем). Поэтому параметры, входящие в  $X$ , выбираются с целью контроля состояния различных узлов и характеристик отдельного узла оборудования, исходя из технико-экономических возможностей их съема, а диагностическая функция представляет собой взаимосвязь частных функций:

$$Y = f(f_1(x_1), \dots, f_i(x_i), \dots, f_m(x_m)), \quad (2)$$

где  $f_i$  – функция оценки состояния  $i$ -го элемента оборудования ЭТК по значениям диагностических признаков  $X_i$ , входящих в состав вектора параметров  $X$ .

Структурирование вектора параметров  $X$  может также осуществляться по принципу принадлежности диагностического признака к определенной группе методов измерений (тепловизионный или вибрационный контроль, контроль рядной активности и т.д.).

Такой подход позволяет своевременно определить и устранить возможные дефекты ЭТК на ранних стадиях развития [5, 6], в том числе за счет оценки ТС оборудования в перспективе и рационального планирования ремонтно-профилактических работ. В этом случае диагностическая функция (2) может быть представлена в виде выражения (3):

$$Y_\tau = f(f_{1\tau}(x_{1\tau}), \dots, f_{i\tau}(x_{i\tau}), \dots, f_{m\tau}(x_{m\tau})), \quad (3)$$

где  $f_{i\tau}$  – функция оценки перспективного технического состояния  $i$ -го элемента оборудования ЭТК по прогнозным значениям диагностических признаков  $X_{i\tau}$ .

## Методика интегральной оценки технического состояния

На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма, отражающая основные этапы работ по интегральной оценке ТС оборудования ЭТК в результате обследования (мониторинга) его основных подсистем, узлов, агрегатов на основе формируемой базы знаний (БЗ), используемой для принятия рациональных управленческих решений.

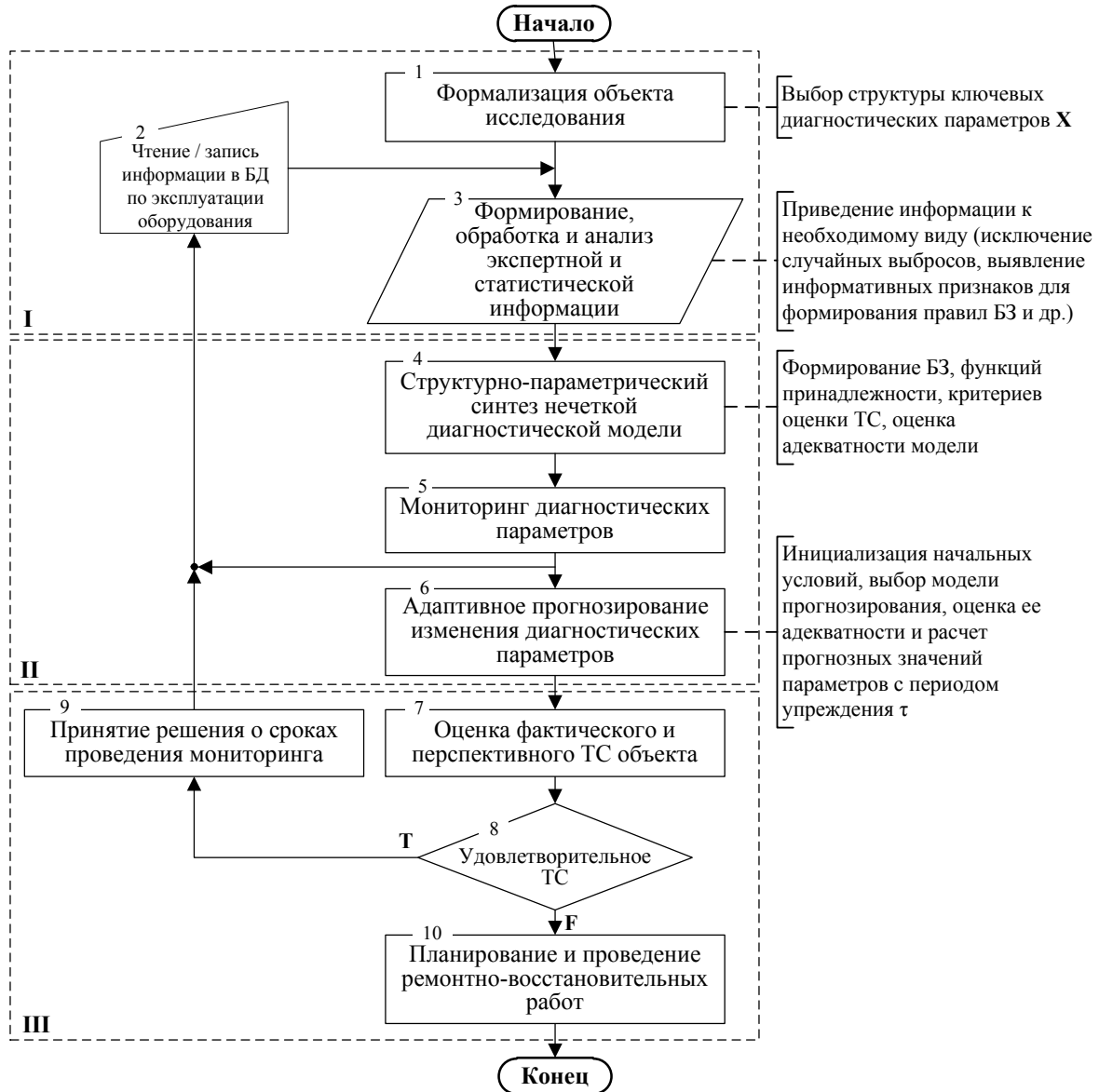


Рис. 1. Алогоритм интегральной оценки текущего и перспективного технического состояния оборудования ЭТК.

Начальным этапом формализации задачи (1) является анализ исследуемого объекта и выбор перечня диагностических параметров  $X$ , наиболее информативных с точки зрения оценки ТС оборудования и его элементов (блок № 1). В результате декомпозиции параметров, входящих в  $X$ , в соответствии со структурой объекта либо технологией проведения измерений формируется итоговая диагностическая функция объекта (2). При этом задача (2), как правило, является сложно формализуемой ввиду особенностей надежного функционирования ЭТК, обусловленных наличием множества параметров, разнородностью по составу и вы-

полняемым функциям, территориальной распределенностью и другими факторами, которые сказываются на полноте, достоверности и однозначности информации, получаемой в процессе их эксплуатации [2 – 7].

Для устранения подобной информационной неоднородности чаще всего приходится использовать не классические детерминированные и вероятностно-статистические методы [8], а методы, основанные на знаниях, в комбинации с имеющимися ретроспективными данными по работе оборудования. Данный подход может быть эффективно реализован с применением аппарата нечеткой логики, построением многомерных баз знаний и адаптивных алгоритмов нечеткого вывода [5]. В этом случае для формирования диагностических моделей используется не только статистика работы оборудования, накапливаемая в процесс его эксплуатации (блок № 2), но и экспертная информация, которой обладают специалисты в рассматриваемой предметной области (блок № 3).

Построение нечетких диагностических моделей (блок № 4) предполагает в первую очередь создание интегрированной базы знаний (БЗ). Она позволяет увязать значения параметров объекта, представленных в виде лингвистических переменных с соответствующими терминами (например, «Низкий», «Средний», «Высокий») и функциями принадлежности, со значениями интегральной функции состояния  $Y$ .

Нечеткие базы знаний синтезируются для каждой частной диагностической функции и связывают значения вектора параметров  $\mathbf{X}_i$  с результатом оценки состояния  $y_i$  отдельного элемента оборудования ЭТК набором правил (нечетких импликаций) в виде «ЕСЛИ  $\langle \mathbf{X}_i \rangle$ , ТО  $\langle y_i \rangle$ » [9, 10] (4).

$$\bigcup_{p=1}^{k_u} \left[ \bigcap_{j=1}^{n_i} (x_{i,j} = a_{i,j}^{up}) \text{ с весом } \omega_i^{up} \right] \rightarrow y_i = d_{iu}, \quad (4)$$

где  $x_{i,j}$  – лингвистическая переменная, соответствующая  $j$ -му параметру, входящему в состав  $\mathbf{X}_i$ ;  $a_{i,j}^{up}$  – оценка параметра  $x_{i,j}$ , выбираемая из нечеткого множества  $A_{j,j}$ , в  $p$ -м правиле, характеризующем величину лингвистической переменной  $y_i$  для оценочного термина  $d_{iu}$ ;  $w_i^{up} \in [0,1]$  – вес правила;  $\cap$  ( $\cup$ ) – логические операции «И» («ИЛИ»).

Для параметра интегральной оценки ТС оборудования ЭТК формируется отдельная база знаний, иерархически увязывающая базы знаний частных задач диагностики (5).

$$\bigcup_{p=1}^k \left[ \bigcap_{i=1}^m (y_i = d_i^{jp}) \text{ с весом } \omega^{jp} \right] \rightarrow y = s_j, \quad (5)$$

где  $d_i^{lp}$  – оценка состояния  $i$ -го элемента оборудования в  $p$ -ом правиле, характеризующем соответствие фактического состояния оборудования  $l$ -му терму выходной переменной  $Y$ .

Каждый терм (нечеткая оценка) входных  $\mathbf{X}$  и выходной переменной  $Y$  представляет собой нечеткое множество, определяемое функциями принадлежности (ФП), которые в различных ситуациях могут быть сформированы экспертно

либо с использованием специальных методов анализа трендов изменения параметров [3, 4, 6].

Правила, входящие в состав баз знаний (4) и (5), формируются экспертно, имитируя логику мышления специалистов, отражая при этом накопленный ими опыт в области обслуживания и оценки состояния ЭТК. Веса правил по умолчанию принимаются равными единице и впоследствии корректируются с целью повышения точности результирующих оценок состояния в процессе накопления статистических данных.

Интеллектуальная обработка данных при решении задачи (1) с использованием нечетких баз знаний (4) и (5), построенных по иерархическому принципу, осуществляется на основе алгоритма Мамдани [9]. При этом для расчета степеней принадлежности  $\mu$  термов входных и выходных переменных используются логические уравнения (6) и (7), позволяющие произвести агрегирование степеней истинности предпосылок и активизацию заключений правил базы знаний [9, 10]

$$\mu_{d_u}(\mathbf{X}_i) = \bigvee_{p=1}^{k_u} [\omega_i^{up} \cdot \bigwedge_{j=1}^{n_i} \mu_{a_{i,j}^{up}}(x_{i,j})], \quad (6)$$

$$\mu_{s_l}(\mathbf{X}) = \bigvee_{p=1}^k [\omega^{jp} \cdot \bigwedge_{i=1}^m \mu_{d_i^{jp}}(\mathbf{X}_i)], \quad (7)$$

где  $\bigvee$  ( $\bigwedge$ ) – операции максимизации (минимизации) соответствующих нечетких множеств.

Результат вычислений определяется нечетким множеством

$$\tilde{Y} = \{ \mu_{s_1}(\mathbf{X})/s_1, \mu_{s_2}(\mathbf{X})/s_2, \dots, \mu_{s_l}(\mathbf{X})/s_l \}.$$

Интегральная оценка ТС оборудования  $Y$  может быть получена в формате решения задачи классификации (8) либо в виде числа (9), определяемого путем преобразования (дефаззификации) представленного ранее нечеткого множества по методу центра тяжести [9].

$$Y = \arg(\mu_S(\mathbf{X})) = \arg \max_{\{s_1, s_2, \dots, s_l\}} (\mu_{s_1}(\mathbf{X}), \dots, \mu_{s_l}(\mathbf{X})), \quad (8)$$

$$Y = \int_{Y_{\min}}^{Y_{\max}} Y \mu_S(\mathbf{X}) dY / \int \mu_S(\mathbf{X}) dY. \quad (9)$$

Для обеспечения точности результата оценки ТС оборудования и снижения субъективности, вносимой экспертами при формировании правил базы знаний и выборе функций принадлежности, выполняется настройка нечеткой диагностической модели с использованием информации, полученной с реального объекта. Оптимизация параметров модели (преимущественно весов экспертных правил) может быть выполнена как на основе традиционных методов и алгоритмов, так и с применением эвристических подходов [11]. В результате формируется гибридная нечеткая модель, которая обладает способностью к адаптации при изменении условий функционирования объекта. В качестве критерия оптимизации чаще всего выступает среднеквадратическое отклонение  $RMSE$  модельных данных от экспериментальных [9, 10]. Критерием точности (адекватности) модели является допустимый (в пределах 5-10 %) уровень средней ошибки распознавания (класси-

фикации) ТС оборудования  $MRE$ :

$$MRE = \frac{1}{K} \sum_k \Delta_k(F(X^{(k)}, \Omega)), \quad (10)$$

где  $F(X^{(k)}, \Omega)$  – результат моделирования при значениях входных параметров  $X^{(k)}$  и весах  $\Omega$  правил базы знаний;  $\Delta_k(F(X^{(k)}, \Omega))$  – функция, принимающая значения 0 (верно распознанное состояние) и 1 (ошибочно распознанное состояние).

Использование модели, адаптированной под конкретный тип оборудования ЭТК, позволяет оценивать состояние его элементов по результатам измерений (мониторинга) ключевых диагностических параметров (блок № 5), осуществляемых с определенной установленной периодичностью.

Отметим, что в рамках применения современных методов и средств эффективного обслуживания разнородных элементов ЭТК важной задачей является планирование сроков проведения профилактических мероприятий и ремонтов оборудования, исходя не только из его актуального (текущего), но и перспективного ТС. При этом в ряде работ [5, 6] показана возможность применения для этих целей аппарата краткосрочного прогнозирования, позволяющего сократить время аварийных простоев оборудования и повысить эффективность использования ресурсов предприятия в целом (трудовых, материальных, денежных) при реализации концепции технического обслуживания и ремонта ответственных элементов ЭТК.

Рассмотрим более детально механизм краткосрочного прогнозирования изменения параметров  $x_i$  оборудования с возможностью адаптации прогнозных значений к влиянию различных сложно формализуемых случайных факторов (нестационарные процессы, структурные сдвиги во временных рядах и др.) [6]. Процедура адаптивного прогнозирования изменения диагностических параметров в рамках функционирования общего алгоритма оценки текущего и перспективного состояния ЭТК представлена функциональным блоком № 6 (рис. 1). К основным стадиям реализации функции блока № 6 относятся: обработка исходных данных (частично реализуется в блоке № 3) и инициализация модели; селекция оптимального варианта модели формирования начальных условий; критериальный выбор адаптивной модели краткосрочного прогнозирования (АМП), результирующее прогнозирование с периодом упреждения  $\tau$  и оценка адекватности полученных результатов (по прошествии времени).

Согласно процедуре комплексного адаптивного прогнозирования формируется множество моделей формирования начальных условий (НУ) (11), среди которых могут быть использоваться как простейшие линейные выражения, так и нелинейные формы зависимости (например, экспоненциальная, степенная, логарифмическая и др.) [1, 8]

$$IM = \{im_1, im_2, \dots, im_r\}, \quad (11)$$

где  $r$  – количество моделей, вошедших в множество  $IM$ .

Далее строится множество (12), содержащее различные адаптивные предикторы (локальные модели прогнозирования), способные на основе известных (расчетных) значений начальных условий осуществлять прогнозную оценку измене-

ния диагностических параметров оборудования с учетом их адаптации к изменяющимся условиям эксплуатации. Фактически это означает использование различных моделей в различные моменты времени.

$$FM = \{fm_1, fm_2, \dots, fm_q\}, \quad (12)$$

где  $q$  – количество моделей, вошедших в множество  $FM$ .

Как правило, множество  $FM$  формируется из моделей, учитывающих различные потенциально возможные формы временных рядов: линейные, линейно-аддитивные / мультипликативные, периодические (сезонные), трендовые компоненты, в том числе со случайными выбросами, и др. К числу таких моделей могут быть отнесены, например, модели на основе автокорреляционного анализа временных рядов, Тейла-Вейджа, Тригга-Лича, полиномиальные и др. [5, 6].

Работа предлагаемой процедуры адаптивного прогнозирования строится на выборе оптимальных НУ и АМП посредством их ранжирования на основе векторов оценочных критериев  $EV$  и  $PV$  (13).

$$EV_i = \begin{pmatrix} 1/r_i^2 \\ MSE_i \\ MAPE_i \end{pmatrix} \rightarrow \min, \quad PV_i = \begin{pmatrix} MSE_i \\ MAPE_i \\ \sigma \end{pmatrix} \rightarrow \min, \quad (13)$$

где  $r^2$  – коэффициент детерминации;  $MSE$  и  $MAPE$  – средний квадрат ошибки и средняя абсолютная процентная ошибка;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение прогнозных оценок значений технических параметров ЭТК.

Отметим, что критерий  $MAPE$  с алгебраической точки зрения не работает в отношении нулевых членов временных рядов, поскольку вызывает исключение. Однако обработка подобного исключения реализуется программно [5]: при возникновении некорректной операции в отношении критериев, содержащих частное с нулевыми элементами, вызывается исключение, которое в свою очередь обрабатывается модулем нормирования численных значений. Отсюда следует, что расчет параметров производится в другом диапазоне численных значений, устраняющем неопределенность. Далее полученный таким образом результат подлежит обратному преобразованию (в именованные единицы).

При выборе начальных условий и АМП учитывают следующие целевые функции векторов (13):  $r^2 \rightarrow \max$ ,  $r^2 \in (0, 1)$ ;  $MSE$ ,  $MAPE$ ,  $\sigma \rightarrow \min$ . Выбор данных критериев обусловлен спецификой объекта исследования, в частности необходимостью работы с малыми выборками данных и нестационарными (немонотонными) временными рядами (например, при скачкообразном изменении сигнала в определенные моменты времени – резкое повышение концентрации водорода в трансформаторном масле).

Оценка адекватности полученных результатов прогнозирования может осуществляться на основе показателя  $MAPE$ , а также 68 % и 95 % границ доверительных интервалов [8].

В результате с использованием АМП и нечеткой диагностической модели формируются оценки фактического и перспективного ТС оборудования (блок № 7). В случае удовлетворительного состояния оборудования (блок № 8) принимается решение о сохранении или изменении сроков проведения последующего

мониторинга его параметров (блок № 9), с записью результатов в базу данных с целью актуализации и пополнения информации (блок № 2). Неудовлетворительное состояние оборудования является признаком наличия критических дефектов в его элементах и сигналом для планирования сроков проведения профилактических работ (блок № 10), что позволяет предупредить развитие потенциальных аварийных ситуаций.

### Исследование методики

В качестве примера рассмотрим частную задачу оценки и прогнозирования состояния системы охлаждения силовых маслонаполненных трансформаторов средней мощности по результатам тепловизионного обследования [12 – 14]. Контролируемыми параметрами в данном случае являются:  $p_1, p_2$  – максимальная и минимальная температуры в точках поверхности бака трансформатора и конструктивных элементов системы охлаждения;  $p_3, p_4$  – максимальная и минимальная температуры в точках поверхности устройства регенерации масла. Вектор входных переменных нечеткой модели образован агрегированными параметрами  $x_1 = p_1 - p_2$  (разность температур по поверхности бака трансформатора) и  $x_2 = p_3 - p_4$  (разность температур по поверхности устройства регенерации масла).

На рис. 2 приведена коррелограмма для максимальной температуры поверхности бака трансформатора, согласно которой в изучаемом временном ряде параметра  $p_1$  можно выделить наличие определенной периодичности (сезонного характера) изменений. Схожий характер изменений был установлен и для остальных параметров:  $p_2, p_3, p_4$ . Кроме того, анализ коэффициента автокорреляции первого порядка ( $r_1 = 0,756$ ) свидетельствует о достаточно существенной связи текущих уровней ряда от предшествующих им значений. Как следует из графика, структура ряда такова, что каждый следующий уровень  $p_{1,t}$  зависит от  $p_{1,t-6}, p_{1,t-12}, p_{1,t-18}, p_{1,t-24}$  в большей степени, чем от других уровней.

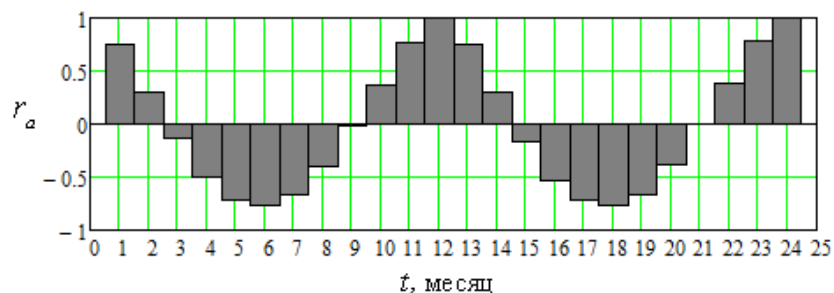


Рис. 2. Коррелограмма для параметра максимальной температуры поверхности бака трансформатора.

С учетом знаков наиболее высоким оказался коэффициент автокорреляции порядка  $r_a = 12$ , свидетельствующий о циклическом изменении параметра  $p_1(t)$ . Таким образом, анализ автокорреляционной функции позволил выявить наличие в изучаемом временном ряде линейной тенденции и определенной периодичности (аналогично для параметров  $p_2, p_3, p_4$ ). Данное обстоятельство учитывается механизмом адаптивного прогнозирования теплового состояния силового масло-



наполненного трансформатора при выборе конкретного адаптивного предиктора (выражения для прогнозирования).

На рис. 3, 4 приведен пример итоговой оценки фактического и прогнозного состояния параметров максимальной и минимальной температуры в точках поверхности бака трансформатора ( $p_1$  и  $p_2$ ). На основе 68 % и 95 % границ доверительных интервалов соответственно  $F_{68+} / F_{68-}$  и  $E_{95+} / E_{95-}$  (рис. 4) и величины  $MAPE$  (12) можно судить о точности работы алгоритма адаптивного прогноза  $E_1$  и  $E_2$  (рис. 4). Величина среднего квадрата ошибки для рассматриваемых параметров ( $p_1 - p_4$ ) составила в среднем около 0,87 (87 %).

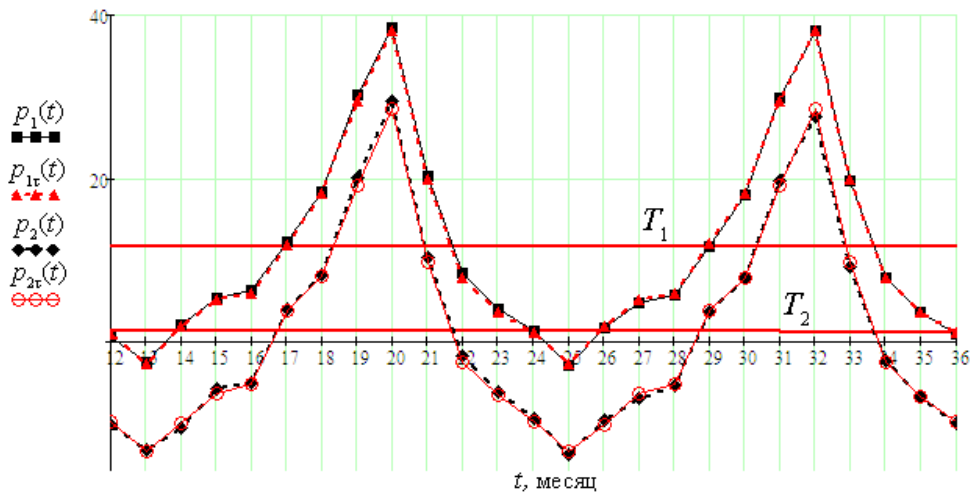


Рис. 3. Прогноз параметров максимальной и минимальной температуры в точках поверхности бака трансформатора.

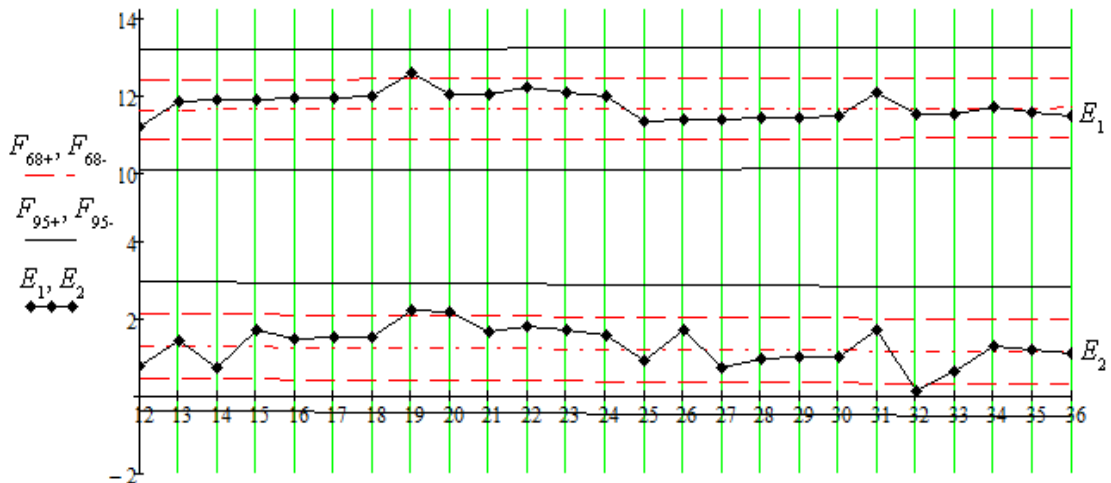


Рис. 4. Оценка точности адаптивного прогноза.

С учетом результатов прогнозирования определяются интегральные оценки состояния системы охлаждения трансформатора на основе нечеткой модели (рис. 5), параметры которой определены с использованием статистических данных по эксплуатации трансформаторов ТМН-6300/35, полученных с электросетевых объектов Пермского края за период 2011-2013 гг.

Состояние оборудования  $Y$  оценивалось наличием дефектов определенного уровня и характера (рис. 5), что равносильно оценкам по шкале значений «Допустимое», «Отклонение от нормы», «Критическое», а шкала оценки контролируется

мых температурных параметров  $x_i$  представлена нечеткими термами «Низкая», «Средняя», «Высокая» с трапецидальными функциями принадлежности.

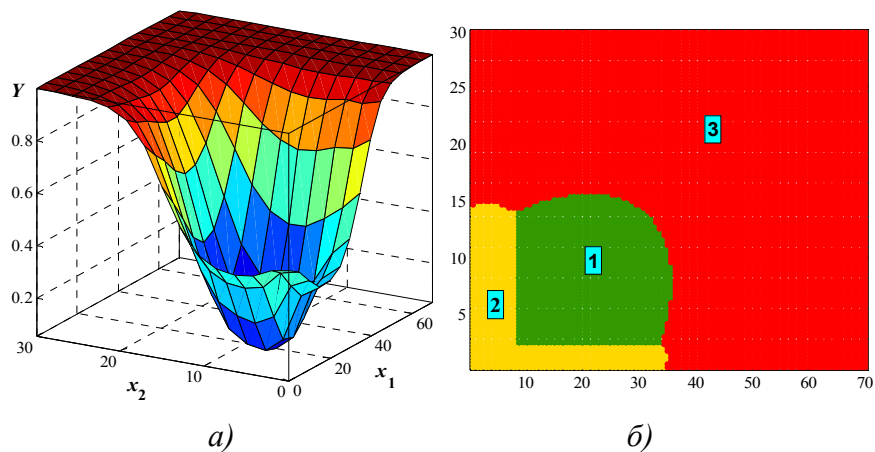


Рис. 5. Зависимость оценок фактического состояния бака трансформатора от значений контролируемых параметров: а) функции отклика величины  $Y$ ; б) области классов состояний (1 – отсутствие дефектов/незначительные дефекты; 2 – нарушение циркуляции масла; 3 – аварийный перегрев).

Качество модели в данном случае обеспечивается высоким уровнем соответствия результатов моделирования заключениям, содержащимся в формулярах диагностики подстанционного оборудования, как показано в таблице.

№ п/п	Тип нечеткой диагностической модели	Значение критерия			
		Обучающая выборка		Тестовая выборка	
		$MRE, \%$	$RMSE$	$MRE, \%$	$RMSE$
1	До настройки весов правил	6,010	0,481	8,649	0,477
2	После настройки весов правил	2,010	0,163	2,162	0,147

### Заключение

Предложена методика интегральной оценки текущего и прогнозного ТС оборудования ЭТК, которая позволяет с высокой степенью достоверности определять наличие критических дефектов и предупреждать развитие аварийных ситуаций в электроэнергетических системах. Показана возможность практического использования методики для интегральной оценки ТС силового маслонаполненного оборудования (трансформаторов), достоверность которой составила более 90 %.

По результатам анализа графиков, характеризующих прогнозные изменения параметров нагрева элементов трансформатора, можно установить сезонный характер изменения температуры верхних и нижних слоев масла. При этом за рассматриваемый период величины интегральных оценок ТС оборудования, полученные с использованием нечеткой модели (рис. 2), не превысили допустимых значений.

Отметим, что предложенные решения по оценке и прогнозированию технического состояния ЭТК следует рассматривать на системном уровне во взаимо-

действии с процедурами планирования технического обслуживания и ремонта оборудования в условиях неопределенности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Петроченков А.Б.* О подходах к оценке технического состояния электротехнических комплексов и систем // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 12. – С. 16-20.
2. *Petrochenkov A.B.* Regarding life-cycle management of electrotechnical complexes in oil production // Russian Electrical Engineering, – 2012. – Vol. 83, № 11. – P. 621-627.
3. *Елтышев Д.К.* Экспертно-статистический метод оценки работоспособности электротехнического оборудования // Системы. Методы. Технологии. – 2015. – № 4(28). – С. 79-85.
4. *Елтышев Д.К.* Интеллектуализация процесса диагностики состояния электротехнического оборудования // Информатика и системы управления. – 2015. – № 1(43). – С. 72-82.
5. *Khoroshev N.I., Kazantsev V.P.* Management support of electroengineering equipment servicing based on the actual technical condition // Automation and Remote Control. – 2015. – Vol. 76, № 6. – P. 1058-1069.
6. *Казанцев В.П., Петроченков А.Б., Ромодин А.В., Хорошев Н.И.* Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 28–34.
7. *Хорошев Н.И., Казанцев В.П.* Применение правил нечеткой логики при эксплуатации электротехнического оборудования // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 59-64.
8. *Барзилович Е.Ю.* Модели технического обслуживания сложных технических систем. – М.: Высш. школа, 1982.
9. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
10. *Shtovba S.D., Pankevich O.D., Nagorna A.V.* Analyzing the criteria for fuzzy classifier learning // Automatic Control and Computer Sciences. – 2015. – Vol. 49, № 3. – P. 123-132.
11. *Кычкин А.В., Чудинов А.В.* Эвристический алгоритм оптимизации мощности в активно-адаптивной сети // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 3 (15). – С. 97-107.
12. *Алексеев Б.А.* Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии. – М.: Энергопрогресс, 2010.
13. *Хорошев Н.И.* Оценка технического состояния силового маслонаполненного электротехнического оборудования в различных режимах его работы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 4. – С. 162-167.
14. *Елтышев Д.К., Хорошев Н.И.* Диагностика силового маслонаполненного трансформаторного оборудования тепловых электростанций // Теплоэнергетика. – 2016. – № 8. – С. 32-40.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии С.В. Шалобановым.*

*E-mail:*

*Хорошев Николай Иванович – horoshev@msa.pstu.ru*

*Елтышев Денис Константинович – eltyshhev@msa.pstu.ru*