

УДК 621.311:658.58:004.89

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.3.06

Д.К. Елтышев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ

В условиях цифровизации современной экономики и внедрения интеллектуальных систем в различных сферах, в том числе в электроэнергетике, важное значение приобретают технологии работы с информацией различного объема и содержания для принятия управленческих решений. Обеспечение надежности и экономичности эксплуатации объектов электросетевого комплекса требует применения механизмов комплексной оценки работоспособности электротехнического оборудования на основе актуальной информации о его состоянии. **Цель:** описание принципов комплексной оценки состояния электротехнического оборудования с использованием технологии интеллектуального анализа данных, получаемых в ходе неразрушающего контроля его ключевых элементов. **Методы:** предлагается системный подход к управлению техническим состоянием электротехнического оборудования по результатам неразрушающего контроля его элементов и интеллектуального анализа полученных данных. Рассмотрен вариант построения моделей комплексной оценки состояния оборудования с использованием гибридной нейронечеткой технологии. **Результаты:** предложена модель системы проактивного управления состоянием оборудования, предполагающая выбор и использование различных методов интеллектуального анализа информации об изменении его ключевых диагностических параметров и формирование оперативных и достоверных решений при планировании технического обслуживания и ремонта. Предложена методика построения нейронечетких моделей для определения фактического и прогнозного состояния оборудования, включая процедуры их настройки и адаптации к изменению тенденций в его работе. Приведен пример построения моделей для задачи комплексной оценки состояния силовых маслонаполненных трансформаторов. Сформирована база нечетких правил, позволяющая анализировать наличие типовых дефектов трансформаторного оборудования. Осуществлены настройка и тестирование моделей с использованием данных с объектов нефтедобычи и результатов имитационного моделирования. **Практическая значимость:** показано, что полученные решения позволяют определять класс состояния оборудования с погрешностью не более 10 %, а также улучшать результат при поступлении новых данных из системы неразрушающего контроля, что делает возможным использование предложенного подхода для построения эффективной системы управления процессом эксплуатации оборудования, в том числе на основе технологий интегрированной логистической поддержки.

Ключевые слова: электротехническое оборудование, неразрушающий контроль, техническое состояние, анализ данных, интеллектуальные технологии, нечеткая логика, нейронные сети.

D.K. Eltyshev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

FEATURES OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT COMPLEX CONDITION ASSESSMENT BASED ON NON-DESTRUCTIVE CONTROL AND INTELLIGENT DATA ANALYSIS

The modern economy digitalization and the introduction of intelligent systems in various fields, including in the electric power industry, needs for technologies for working with various information for making management decisions. Ensuring the reliability and efficiency of power grid facilities operation, therefore, requires the use of mechanisms for the electrical equipment complex assessment based on relevant information about its condition. **Purpose:** description of the principles of a complex assessment of the electrical equipment condition using the technology of intelligent analysis of data obtained in the course of non-destructive control of its key elements. **Methods:** a systematic approach to managing the electrical equipment technical condition based on the results of non-destructive control of its elements and intellectual analysis of the data obtained was proposed. A variant of constructing models for a complex assessment of the equipment condition using a hybrid neuro-fuzzy technology was considered. **Results:** a model of a proactive control system for the equipment condition was proposed. The approach implies the selection and use of various methods of intelligent analysis of information about changes in its key diagnostic parameters and the formation of prompt and reliable decisions when planning maintenance and repair. A technique for constructing neuro-fuzzy models was proposed to determine the actual and predicted equipment condition, including procedures for their adjustment and adaptation to changing trends in its operation. An example of constructing models for the problem of a complex assessment of the power oil-filled transformers condition was given. A base of fuzzy rules, which makes it possible to analyze the presence of typical defects in transformer equipment has been formed. The tuning and testing of models was carried out using data from oil production facilities and the results of simulation. **Practical relevance:** it has been shown that the solutions obtained make it possible to determine the class of equipment condition with an error of no more than 10 %, as well as improve the result when new data is received from the non-destructive control system. Therefore there is a possibility to use the proposed approach for building an effective control system for the equipment operation process, based on technologies of integrated logistics support.

Keywords: electrical equipment, non-destructive control, technical condition, data analysis, intelligent technologies, fuzzy logic, neural networks.

Введение

В современных условиях эффективная работа практически любых технологических и гражданских объектов зависит от бесперебойного снабжения их электрической энергией, что обеспечивается надежным и безопасным функционированием всех элементов электроэнергетической системы, включая работоспособность входящих в их состав установок и электрооборудования (ЭО) [1–3]. Тенденции цифровизации всех отраслей экономики предполагают переход к интеллектуальным электросетям, обладающим высокой отказоустойчивостью, надежностью и адаптивностью [4–7], что невозможно без ком-

плексного внедрения современных цифровых (информационно-телекоммуникационных, аналитических и управляющих) решений [1–8]. Задача подобных решений – создание энергоинформационной инфраструктуры, обеспечивающей эффективный контроль и оперативное управление техническим состоянием (ТС) ЭО по критериям минимизации аварийных ситуаций и времени простоев оборудования, а также снижения совокупных затрат на его эксплуатацию [2, 3, 6, 9]. Работа такой сложной распределенной структуры опирается на возможность получения и обработки информации о работе оборудования без его отключения от питающей сети. Поэтому вопросы интеграции технологий неразрушающего контроля (НК) в процесс эксплуатации ЭО и получения объективных данных о его работе являются основой для принятия рациональных решений инженерно-техническим персоналом в краткосрочной и долгосрочной перспективе [1, 4, 10].

Постановка цели и задач исследования

Комплексная оценка технического состояния (ТС) ЭО должна осуществляться в соответствии с современными механизмами диагностирования (предиктивная, проактивная, прескриптивная). Процедура диагностики ЭО представляет уровень 2 концептуальной модели управления его ТС по данным НК [10], которая ориентирована на «гибкие» стратегии эксплуатации оборудования и комплексное использование различных технологий обработки и анализа данных, что позволяет получить на выходе достоверный результат и оперативно реагировать на изменение состояния ЭО.

Обобщенная структура системы управления процессом эксплуатации ЭО с использованием технологии НК приведена на рис. 1.

В соответствии с [11–13] упрощенная модель комплексной оценки ТС ЭО на основе технологии сбора и обработки данных может быть рассмотрена как функция вида:

$$K(t) = f(M, \mathbf{X}(t), N, Y), \quad (1)$$

где $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ – набор методов и программно-технических средств неразрушающего контроля ЭО; $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ определяет наборы диагностических параметров ЭО для каждого вида контроля $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$, $i = 1:n$; N – вектор граничных условий работоспособности ЭО; $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ – множество классов нормативных или дефектных состояний.

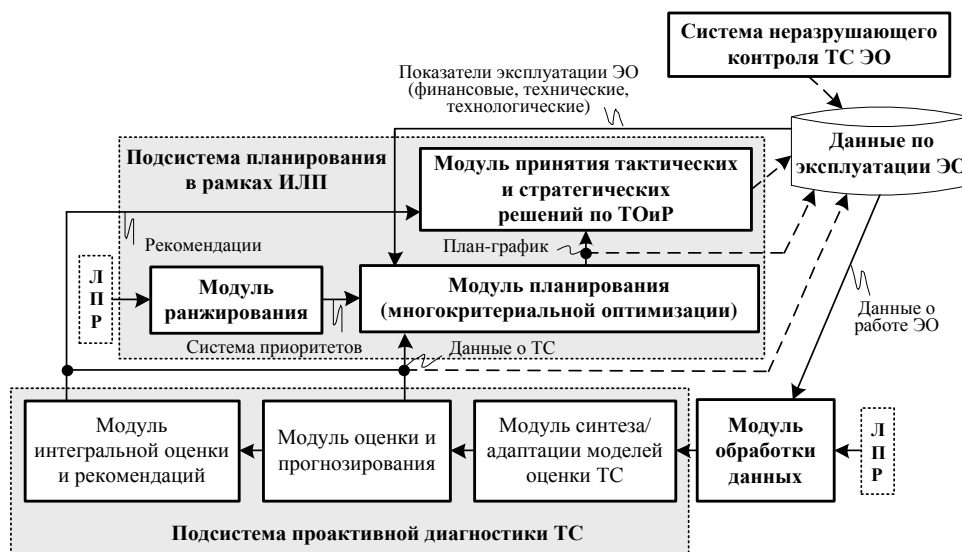


Рис. 1. Структура управления состоянием ЭО по данным НК

Особенности технологии синтеза диагностических моделей (см. рис. 1) на основе классификатора дефектов показаны в [11]. При этом число итоговых оценочных состояний может соответствовать комплексной шкале критериев [11, 12] либо опираться на перечень типовых дефектов в оборудовании, которые можно обнаружить методами НК. Примеры распространенных методов оценки ТС ЭО представлены на рис. 2 [1, 14].

Эффективная реализация приведенного на рис. 1 подхода к организации системы контроля ТС ЭО предполагает использование современных методов анализа и обработки данных. Примеры использования инструментов обработки данных на основе интеллектуальных технологий, нечеткой логики, машинного обучения приведены в работах [3, 15–21].

Основаниями для интеллектуализации процедуры оценки и прогнозирования ТС ЭО являются: неструктурированный и плохо формализуемый характер задачи; неоднозначность в нормировании диагностических признаков и доля субъективизма, вносимая принимающим решение персоналом; возможная неполнота данных по некоторым признакам; необходимость выработки обоснованных решений в условиях временных ограничений; необходимость корректировки и введения дополнительной информации и итеративный характер формирования решений [1, 2, 19, 20].



Рис. 2. Характеристика методов контроля ТС ЭО

Вопросы подготовки данных для формирования интеллектуальных моделей, а также логического описания диагностических параметров при помощи нечетких функций и процедур кластерного анализа частично рассмотрены в [22].

Стоит отметить, что решение задач в данной области с учетом особенностей развития электроэнергетической отрасли по-прежнему является актуальным. Поэтому наличие комплексного подхода, представленного на рис. 1, а также проработка отдельных механизмов формирования достоверных оценок ТС ЭО для различных типов оборудования и различных условий его эксплуатации, а также инструментов их реализации на уровне интегрированных информационных решений соответствуют энергетической стратегии РФ.

В данной статье предлагается рассмотреть гибридный подход, основанный на применении нейронечетких моделей (ННМ), позволяющих осуществлять оценку отдельных узлов или подсистем оборудования, а также контролировать его состояние при помощи различных методов НК. При этом особенностью предлагаемого подхода (см. рис. 1) является возможность использовать различные методы интеллектуального анализа данных в комплексе, т.е. формировать адаптивные модели оценки ТС ЭО с возможностью выбора наиболее эффективного метода.

Методика контроля ТС ЭО на базе нейронечеткого моделирования

В качестве инструмента для организации системы контроля ТС ЭО рассмотрим адаптивную сеть нейронечеткого вывода *ANFIS*, которая представляет собой пятислойную нейронную сеть прямого распространения сигнала особого типа, имеет структуру, работающую как система нечеткого логического вывода Сугено с соответствующей настройкой словаря правил и функций принадлежности [23].

Если обозначить в качестве $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ входы сети (вектор диагностических параметров), а y – выход сети (класс состояния), то справедливы следующие функциональные особенности каждого слоя модели:

– узлы первого слоя представляют собой конкретные термы с соответствующей ФП (гауссова, колоколообразная и др.). Количество узлов равняется сумме мощностей терм-множеств входных переменных X , а выход узла – степень принадлежности значений входной переменной к нечетким термам с соответствующими значениями настроечных параметров (a , b и c):

$$\mu_r(x_i) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_i - c}{a} \right|^{2b}}; \quad (2)$$

– узлам второго слоя (общее количество – m) соответствует одно нечеткое правило, а их выходом являются степени выполнения правила (посылка правила как произведение всех входных сигналов) τ_r , где $r = 1:m$;

– узлы третьего слоя (всего m) рассчитывают относительную степень выполнения каждого из нечетких правил:

$$\tau_r^* = \frac{\tau_r}{\sum_{j=1, \dots, m} \tau_j}; \quad (3)$$

– узлы четвертого слоя (заклучения правил) определяют вклад каждого из нечетких правил в выход сети:

$$y_r = \tau_r^* (b_{0,r} + b_{1,r} x_1 + \dots + b_{n,r} x_n); \quad (4)$$

– единственный узел пятого слоя (отражение результата) представляет собой сумму вкладов всех правил:

$$y = y_1 + \dots + y_r + \dots + y_m. \quad (5)$$

В качестве алгоритмов обучения моделей может быть использована классическая комбинация метода градиентного спуска в виде алго-

ритма обратного распространения ошибки (настройка параметров ФП) и метода наименьших квадратов (настройка весов правил) [23]. Обучение предполагает прямой и обратный проход по всем слоям нейронной сети и подстройку параметров модели, обеспечивающих максимальное соответствие фактического выхода сети и желаемого (задаваемого обучающей выборкой).

Общий алгоритм применения предложенного подхода с учетом процедуры синтеза ННМ представлен на рис. 3.

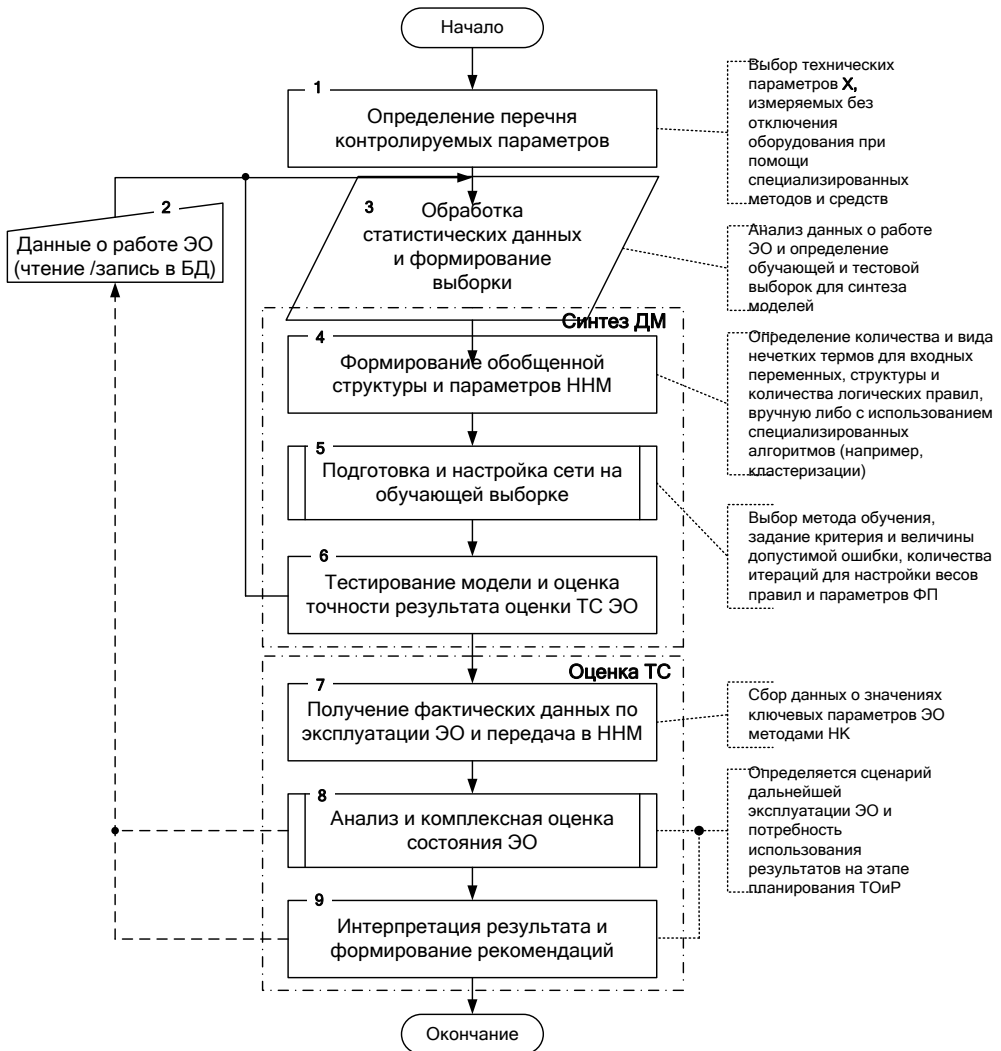


Рис. 3. Блок-схема методики контроля состояния ЭО на основе ННМ

Методика позволяет осуществлять синтез ННМ (блоки №4-6) и их адаптацию с обеспечением требуемой точности результата, а также оценку фактического состояния ЭО с формированием базовых рекомендаций относительно их дальнейшей эксплуатации.

Пример практического использования подхода к оценке ТС ЭО

В качестве примера использования ННМ в задачах оценки ТС ЭО рассматривается упрощенная модель оценки состояния силовых маслонаполненных трансформаторов (СМТ) напряжением 110 кВ [24]. Исходные данные для построения моделей получены из отчетов специализированных организаций по мониторингу ТС трансформаторов ТДТН-16000/110 У1 с подстанций, осуществляющих электроснабжение объектов нефтедобычи Пермского края, а также по результатам имитационного моделирования с учетом анализа требований нормативно-технической документации. Принимая во внимание большой спектр контролируемых параметров СМТ, для построения тестовой системы оценки ТС используются методы тепловизионного контроля, хроматографического анализа растворенных газов (ХАРГ) и экспертного контроля, позволяющие работать с разносторонней информацией об объекте [24, 25].

Обобщенная структура системы комплексного контроля приведена на рис. 4. Оценка теплового состояния трансформатора осуществляется на основе следующих диагностических признаков: x_{11} – температура верхних слоев масла; и x_{12} – температура нагрева обмоток; x_{13} – температура контактов и x_{14} – температура нагрева магнитопровода. Каждая переменная описана гауссовыми ФП с тремя нечеткими термами. Предельные значения параметров согласованы с требованиями нормативно-технической документации (при номинальной нагрузке: для температуры верхних слоев масла – 95°C; для обмоток трансформатора – 70°C при температуре окружающего воздуха 35°C; для температуры контактов и магнитопровода – в пределах 60–95°C).

В качестве значений выходной переменной y_1 рассматривается шкала из трех состояний: «отсутствие дефектов» (s_{11}), «возможное зарождение дефектов» (s_{12}), «развитие дефектов на критическом уровне» (s_{13}), которые определяются изменением значений входных температурных параметров. Общее количество правил в базе знания системы нечеткого вывода равно 45 и имеет вид, соответствующий таблице.

Точность модели после обучения и тестирования составляет 92 %.

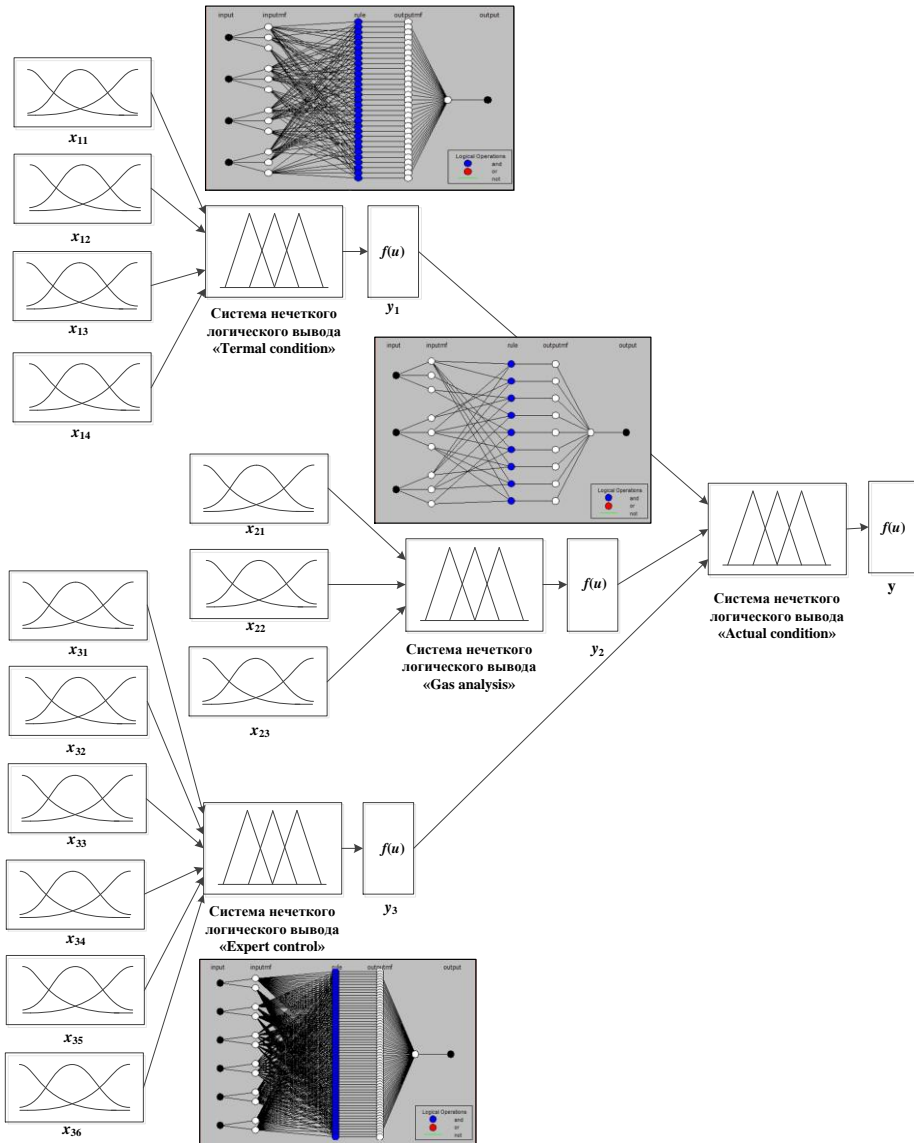


Рис. 4. Структура иерархической (пошаговой) оценки состояния ЭО по данным неразрушающего контроля

Для оценки результатов хроматографического анализа газов, растворенных в масле, выбраны следующие входные параметры, определяющие соотношение таких газов, как водород H_2 (дефекты электрического нагрева – разряды в масле), ацетилен C_2H_2 (перегрев активных элементов), этан C_2H_6 (нагрев масла и твердой изоляции обмоток), метан CH_4 и этилен C_2H_4 (высокотемпературный нагрев масла и твердой

изоляции): x_{21} –соотношение C_2H_2/C_2H_4 ; и x_{22} – соотношение CH_4/H_2 ; x_{23} – соотношение C_2H_4/C_2H_6 . Каждый параметр задан тремя термами с гауссовыми ФП.

Анализ нормативно технической документации позволил выявить две ключевые группы дефектов, идентифицируемых с использованием метода: электрические (пробой твердой изоляции, увлажнение изоляции, дуговые разряды и др.) с возникновением частичных разрядов различной плотности и мощности и термические, в различных диапазонах температур (перегрев проводника, высокая температура «горячей точки», циркулирующие токи в баке и др.). Поэтому в качестве выходной переменной y_2 рассматривается шкала из трех состояний: «отсутствие дефектов» (s_{21}), «электрический дефект» (s_{22}), «термический дефект» (s_{23}). Общее количество правил в базе знание системы нечеткого вывода равно 9 (таблица).

Пример нечетких правил для оценки ТС СМТ

| № | Запись правила |
|--|--|
| <i>Оценка теплового состояния</i> | |
| 1 | ЕСЛИ x_{11} = «Низкая» И x_{12} = «Низкая» И x_{13} = «Низкая» И x_{14} = «Низкая» ТО y_1 = s_{11} |
| 19 | ЕСЛИ x_{11} = «Средняя» И x_{12} = «Низкая» И x_{13} = «Средняя» И x_{14} = «Средняя» ТО y_1 = s_{12} |
| 45 | ЕСЛИ x_{11} = «Высокая» И x_{12} = «Высокая» И x_{13} = «Высокая» И x_{14} = «Высокая» ТО y_1 = s_{13} |
| <i>Оценка концентрации газов в масле</i> | |
| 1 | ЕСЛИ x_{21} = «Низкое» И x_{22} = «Низкое» И x_{13} = «Низкое» ТО y_2 = s_{22} |
| 9 | ЕСЛИ x_{21} = «Низкое» И x_{22} = «Высокое» И x_{13} = «Высокое» ТО y_2 = s_{23} |
| <i>Экспертная оценка состояния</i> | |
| 1 | ЕСЛИ x_{31} = «Отсутствие» И x_{32} = «Отсутствие» И x_{33} = «Отсутствие» И x_{34} = «Отсутствие» И x_{35} = «Отсутствие» И x_{36} = «Отсутствие» ТО y_3 = s_{31} |
| 20 | ЕСЛИ x_{31} = «Отсутствие» И x_{32} = «Наличие» И x_{33} = «Наличие» И x_{34} = «Отсутствие» И x_{35} = «Отсутствие» И x_{36} = «Отсутствие» ТО y_3 = s_{32} |
| 64 | ЕСЛИ x_{31} = «Наличие» И x_{32} = «Наличие» И x_{33} = «Наличие» И x_{34} = «Наличие» И x_{35} = «Наличие» И x_{36} = «Наличие» ТО y_3 = s_{32} |

Точность модели после настройки и тестирования составляет 86 %. Для метода визуальной оценки состояния СМТ приняты следующие параметры, позволяющие диагностировать наличие дефектов и нарушений в работе оборудования (замыкания обмоток, возникновение дуги в масле, течь масла и т.д.): x_{31} – наличие треска внутри трансформатора; x_{32} – наличие трещин или сколов на изоляторах трансформатора; x_{33} – наличие деформаций на баке трансформатора; x_{34} – наличие течи масла на вводах трансформатора; x_{35} – наличие обрывов выводов трансформатора; x_{36} – наличие оплавления контактов. Парамет-

ры оцениваются двумя термами с треугольными ФП, характеризующими факт наличия/отсутствия видимых нарушений в работе элементов трансформатора.

Выходная переменная y_3 оценивается двумя состояниями «наличие дефекта» (s_{31}) и «отсутствие дефекта» (s_{32}) с треугольными ФП. Общее количество правил в нечеткой системе равняется 64 (см. таблица). Учитывая малое количество вариантов, модель позволяет интерпретировать информацию безошибочно.

Вид структуры НМ для полученной системы оценки ТС СМТ представлен на рис. 4. Пример ФП для лингвистической оценки параметров трансформатора на разных уровнях модели приведен на рис. 5.

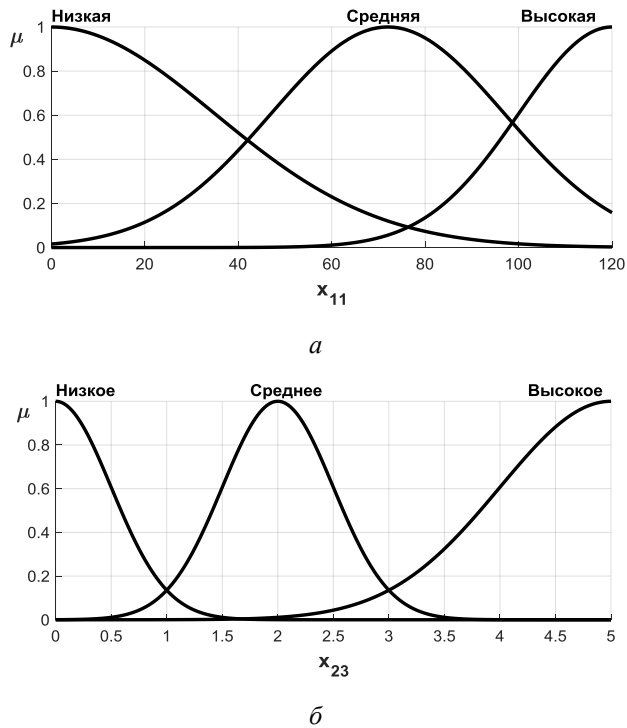


Рис. 5. Пример визуализации функции принадлежности входных параметров НМ: температура масла трансформатора, x_{11} (а); соотношение концентраций этилен/этан, x_{23} (б)

Итоговое заключение о состоянии СМТ формируется с учетом результатов оценки по каждому отдельному методу. Для оценки вариантов (входные переменные) использованы 3 или 2 нечетких термина с треугольными ФП. На выходе системы формируется итоговое заклю-

чение о соответствии ТС ЭО классу состояния: «Отсутствие явных дефектов» (c_1 , продолжение эксплуатации в нормальном режиме), «Развивающийся дефект» (c_2), «Критический дефект» (c_3). Поверхности отклика модели в соответствии с базой нечетких правил (всего 16) приведены на рис. 6.

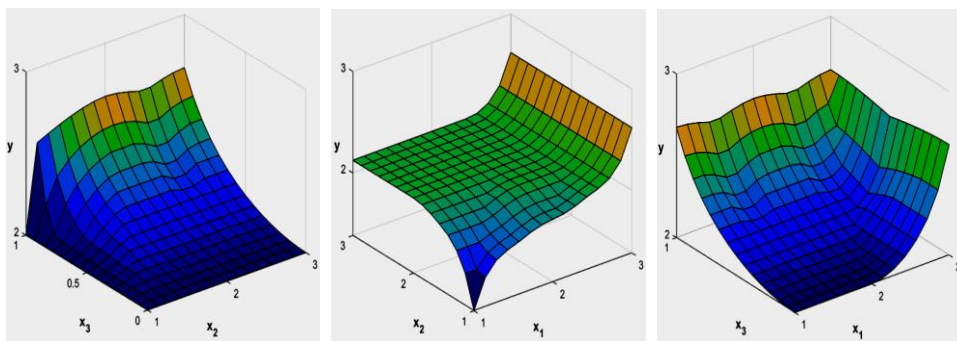
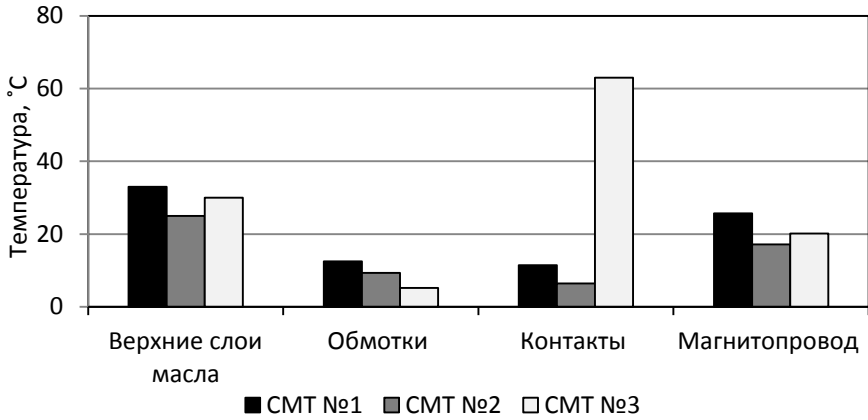


Рис. 6. Визуализация процесса принятия решений при оценке ТС СМТ

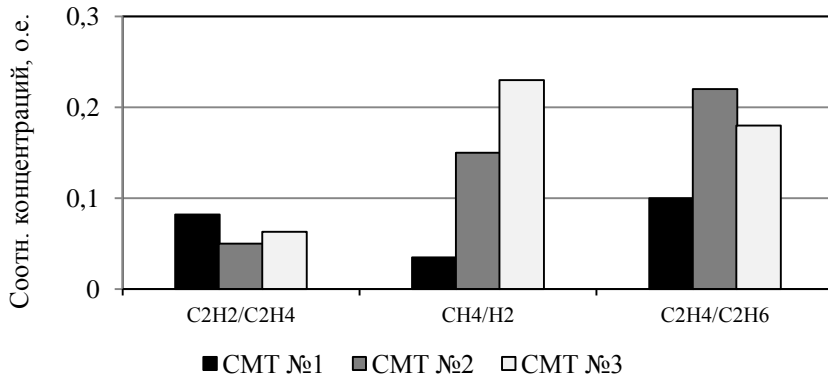
Все указанные на разных уровнях модели классы состояния могут быть расширены с учетом конкретизации видов дефектов и их комплексного проявления.

В качестве примера для апробации построенной модели были выбраны три СМТ ТДТН-16000/110 с напряжением 110/6 кВ, находящиеся на подстанции Усинская в сетевом районе города Оса. На основе полученных данных о работе трансформатора последовательно применены методы для оценки его ТС. Используются возможности нечеткого классификатора, который по полученному классу состояния СМТ определяет наличие реально существующего дефекта (рис. 7).

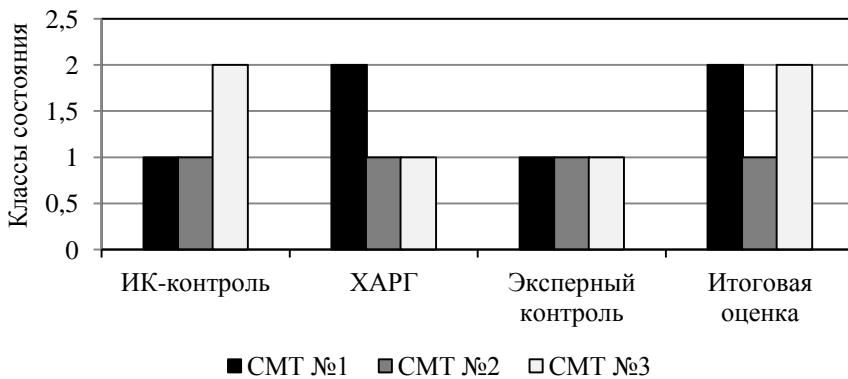
Вывод о текущем состоянии СМТ производится при сопоставлении всех полученных результатов. При анализе обнаружено, что в трансформаторе ТДТН-1600/110 № 2 имеются частичные разряды с низкой плотностью энергии, которые могут возникать вследствие увлажнения изоляции, тогда как у трансформатора № 3 наблюдается температурный дефект контактных соединений, что может сигнализировать о необходимости своевременно провести техническое обслуживание. Такая информация должна оперативно поступать на АРМ управленческого персонала, что позволит своевременно реагировать на факт возникновения дефекта и оперативно принять меры по его устранению, что приведет к предотвращению возможного ущерба от отказа СМТ, экономии средств на его ремонт и увеличит его срок службы.



a



б



в

Рис. 7. Результаты оценки состояния СМТ: тепловизионный контроль (а); анализ газов в трансформаторном масле (б); комплексная оценка (в)

Заключение

В статье рассмотрены аспекты разработки системы комплексной оценки и управления ТС ЭО с использованием технологий неразрушающего контроля и методов интеллектуального анализа данных. Предложенная структура системы (см. рис. 1) позволяет получить гибкий инструмент для достоверного контроля работоспособности оборудования и принятия своевременных решений относительно сценариев его эксплуатации в краткосрочной и долгосрочной перспективе [3, 10, 20].

Использование нейронечеткого подхода дает возможность осуществлять синтез диагностических моделей, позволяющих интуитивно понятно и с высокой точностью (для СМТ она составила более 90 %) определить состояние оборудования, а также производить их адаптацию при изменении набора статистических данных. С этой целью важно обеспечить поддержку функционирования единой информационной среды, которая непрерывно или с заданной периодичностью аккумулирует текущую информацию о значениях диагностических параметров ЭО, а также реальные факты возникновения дефектов в оборудовании.

Реализация системы комплексной оценки и проактивного управления ТС ЭО, адаптивной к изменениям в его работе, позволит в будущем выстроить эффективную систему интегрированной логистической поддержки оборудования и влиять не только на технико-экономические показатели процесса его эксплуатации, но и на качество проектных решений в области создания конкурентоспособных электротехнических изделий.

Библиографический список

1. Основы управления техническим состоянием электрооборудования / А.Н. Назарычев [и др.]. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. – 204 с.
2. Pavlov N.V., Romodin A.V., Petrochenkov A.B. Ensuring reliability in the operational management of the power supply system modes of the mineral industrie's enterprises // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020. – 2020. – P. 1287–1290.
3. Елтышев Д.К. Выбор приоритетов при обслуживании, модернизации и обеспечении безопасности объектов энергетики // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2017. – № 2. – С. 5–10.

4. Smart grid technologies and applications / R. Bayindir, Ilhami Colak, Gianluca Fulli, Kenan Demirtas // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – № 66. – P. 499–516.

5. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // *Энергоэксперт*. – 2009. – № 4. – С. 29–34.

6. Мозохин А.Е., Мозохин А.Е. Анализ перспективного развития энергетических систем в условиях цифровой трансформации российской экономики // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 82–93.

7. Ситников В.Ф., Скопинцев В.А. Интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью // *Электричество*. – 2012. – № 3. – С. 2–7.

8. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Multi-agent approach to modeling of electrotechnical complexes elements at the oil and gas production enterprises // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*. – 2021. – P. 1504–1508.

9. Petrochenkov A.B. Management of effective maintenance of the electrotechnical complexes of mineral resource industry's enterprises based on energy-information model // *Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015*. – 2015. – 18. – P. 122–124.

10. Eltyshev D.K., Kostygov A.M. The concept of efficient control of the condition of electrical equipment according to nondestructive testing data // *Russian Electrical Engineering*. – 2020. – Vol. 91, no. 11. – P. 692–697.

11. Eltyshev D.K., Kostygov A.M. Intelligent diagnostic control and management of the condition of electrotechnical equipment // *Russian Electrical Engineering*. – 2019. – Vol. 90, no. 11. – P. 741–746.

12. Eltyshev D.K. Electric equipment operation scenarios based on the results of non-destructive condition control // *Journal of Physics: Conference Series*. 2. International Conference on Innovation Energy 2020, IE 2020. – 2021. – P. 012010.

13. Елтышев Д.К. К вопросу о разработке интеллектуальной экспертно-диагностической системы для оценки состояния электротехнического оборудования // *Системы. Методы. Технологии*. – 2017. – № 3 (35). – С. 57–63.

14. Хальясмаа А.И. Диагностика электрооборудования электрических станций и подстанций: учеб. пособие. – М.: Флинта: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 64 с.

15. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Muntyan E.R. Development of an intelligent decision support system for electrical equipment diagnostics at industrial facilities // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1156 AISC. – P. 225–233.

16. Колоденкова А.Е., Верещагина С.С. Информационная поддержка принятия решений в системах диагностирования оборудования на основе сетевой модели // *Вестник Ростов. гос. ун-та путей сообщения*. – 2021. – № 1 (81). – С. 47–52.

17. Khal'yasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E. An automated system for taking decisions to assess the actual state of electrical equipment // *Power Technology and Engineering*. – 2016. – Vol. 49, no. 5. – P. 389–392.

18. Хальясмаа А.И. Машинное обучение как инструмент повышения эффективности управления жизненным циклом высоковольтного электрооборудования // *Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та*. – 2020. – Т. 24, № 5 (154). – С. 1093–1104.

19. Eltyshev D.K., Boyarshinova V.V. Intelligent Decision Support in the Electrical Equipment Diagnostics // *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016)*. – 2016. – P. 157–160.

20. Елтышев Д.К. Многокритериальный анализ решений в интеллектуальных системах оценки и управления состоянием энергетического оборудования // *Информатика и системы управления*. – 2018. – № 2 (56). – С. 96–107.

21. Khoroshev N.I., Pogorazdov R.N. Adaptive clustering method in intelligent automated decision support systems // *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016*. – 2016. – P. 296–298.

22. Eltyshev D., Gnutova K. Influence of fuzzy clustering on the accuracy of electrical equipment diagnostic models // *Proceedings of the 6th International Conference on Applied Innovations in IT*. – 2018. – P. 23–28.

23. Круглов В.В., Дли М.И., Годунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.

24. Алексеев Б.А. Крупные силовые трансформаторы: контроль состояния в работе и при ревизии. – М.: Энергопрогресс, 2010.

25. Eltyshev D.K., Khoroshev N.I. Diagnostics of the Power Oil-filled Transformer Equipment of Thermal Power Plants // *Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 63, no. 8. – P. 558–566.

References

1. Nazarychev A.N. et al. Osnovy upravleniia tekhnicheskim sostoianiem elektrooborudovaniia [Basics of managing the technical condition of electrical equipment]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2015, 204 p.
2. Pavlov N.V., Romodin A.V., Petrochenkov A.B. Ensuring reliability in the operational management of the power supply system modes of the mineral industrie's enterprises. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020*, 2020, pp. 1287-1290.
3. Eltyshev D.K. Vybory prioritetrov pri obsluzhivanii, modernizatsii i obespechenii bezopasnosti ob"ektov energetiki [Priority ranking for maintenance, renovation, and ensuring security of power facilities]. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*, 2017, no. 2, pp. 5-10.
4. Bayindir R., Colak Ilhami, Fulli Gianluca, Demirtas Kenan Smart grid technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, no. 66, pp. 499-516.
5. Dorofeev V.V., Makarov A.A. Aktivno-adaptivnaia set' - novoe kachestvo EES Rossii [Actively-adaptive network - a new quality of the UES of Russia]. *Energoekspert*, 2009, no. 4, pp. 29-34.
6. Mozokhin A.E., Mozokhin A.E. Analiz perspektivnogo razvitiia energeticheskikh sistem v usloviakh tsifrovoy transformatsii rossiiskoi ekonomiki [Analysis of the prospective development of energy systems in the context of the digital transformation of the Russian economy]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 82-93.
7. Sitnikov V.F., Skopintsev V.A. Intellektual'naia elektroenergeticheskaya sistema s aktivno-adaptivnoi set'iu [Intelligent electrical power system with active-adaptive grid]. *Elektrichestvo*, 2012, no 3, pp. 2-7.
8. Pavlov N.V., Petrochenkov A.B. Multi-agent approach to modeling of electrotechnical complexes elements at the oil and gas production enterprises. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2021*, 2021, pp. 1504-1508.
9. Petrochenkov A.B. Management of effective maintenance of the electrotechnical complexes of mineral resource industry's enterprises based on energy-information model. *Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015*, 2015, 18, pp. 122-124.

10. Eltyshev D.K., Kostygov A.M. The concept of efficient control of the condition of electrical equipment according to nondestructive testing data. *Russian Electrical Engineering*, 2020, vol. 91, no. 11, pp. 692-697.

11. Eltyshev D.K., Kostygov A.M. Intelligent diagnostic control and management of the condition of electrotechnical equipment. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, no. 11, pp. 741-746.

12. Eltyshev D.K. Electric equipment operation scenarios based on the results of non-destructive condition control. *Journal of Physics: Conference Series. 2. International Conference on Innovation Energy 2020, IE 2020*, 2021, 012010 p.

13. Eltyshev D.K. K voprosu o razrabotke intellektual'noi ekspertno-dagnosticheskoi sistemy dlia otsenki sostoianiia elektrotekhnicheskogo oborudovaniia [To the question of developing intelligent expert-diagnostic system for assessing the electrical equipment condition]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2017, no. 3 (35), pp. 57-63.

14. Khal'iasmaa A.I. Diagnostika elektrooborudovaniia elektricheskikh stantsii i podstantsii [Diagnostics of electrical equipment of power plants and substations]. Moscow: Flinta: Ural'skii universitet, 2017, 64 p.

15. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S., Muntyan E.R. Development of an intelligent decision support system for electrical equipment diagnostics at industrial facilities. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, vol. 1156 AISC, pp. 225-233.

16. Kolodenkova A.E., Vereshchagina S.S. Informatsionnaia podderzhka priniatiia reshenii v sistemakh diagnostirovaniia oborudovaniia na osnove setevoi modeli [Information support for decision-making in equipment diagnostics systems based on a network model]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2021, no. 1 (81), pp. 47-52.

17. Khal'yasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E. An automated system for taking decisions to assess the actual state of electrical equipmen. *Power Technology and Engineering*, 2016, vol. 49, no. 5. pp. 389-392.

18. Khal'iasmaa A.I. Mashinnoe obuchenie kak instrument povysheniia effektivnosti upravleniia zhiznennym tsiklom vysokovol'tnogo elektrooborudovaniia [Machine learning as a tool to improve the efficiency of high-voltage electrical equipment lifecycle management]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, vol. 24, no. 5 (154), pp. 1093-1104.

19. Eltyshev D.K., Boyarshinova V.V. Intelligent Decision Support in the Electrical Equipment Diagnostics. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2016)*, 2016, pp. 157-160.

20. Eltyshev D.K. Mnogokriterial'nyi analiz reshenii v intellektual'nykh sistemakh otsenki i upravleniia sostoianiem energeticheskogo oborudovaniia [Multi-criteria decision analysis in intelligent systems for asses sing and managing of power equipment condition]. *Informatika i sistemy upravleniia*, 2018, no. 2 (56), pp. 96-107.

21. Khoroshev N.I., Pogorazdov R.N. Adaptive clustering method in intelligent automated decision support systems. *Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016*, 2016, pp. 296-298.

22. Eltyshev D., Gnutova K. Influence of fuzzy clustering on the accuracy of electrical equipment diagnostic models. *Proceedings of the 6th International Conference on Applied Innovations in IT*, 2018, pp. 23-28.

23. Kruglov V.V., Dli M.I., Godunov R.Iu. Nechetkaia logika i iskusstvennye neironnye seti [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: Fizmatlit, 2001, 224 p.

24. Alekseev B.A. Krupnye silovye transformatory: kontrol' sostoianiia v rabote i pri revizii [Large power transformers: monitoring of the condition in operation and during audit]. Moscow: Energoprogress, 2010.

25. Eltyshev D.K., Khoroshev N.I. Diagnostics of the Power Oil-filled Transformer Equipment of Thermal Power Plants. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, no. 8, pp. 558-566.

Сведения об авторе

Елтышев Денис Константинович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: eltyshev@msa.pstu.ru).

About the author

Denis K. Eltyshev (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Microprocessor Automation Means Department Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: eltyshev@msa.pstu.ru).

Получено 20.09.2021