

УДК 621.316.1.12

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И МЕТОДОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТКЛИКА ДЛЯ ПРОГНОЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛОСКОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА ШИН

В статье представлены результаты исследований данных, полученных при акустической эмиссии плоскостного электрического контакта, выполненного болтовым соединением алюминиевых шин. Проведено сравнение значений зависимости ультразвукового сигнала от переходного сопротивления и температуры контакта, построенных с помощью методологии поверхностей отклика и нейросетевого базиса. Выполнено обучение нейронной сети для прогнозирования степени развития дефекта контактного соединения на основе данных ультразвука и температуры контакта.

АВТОРЫ:

Р.В. Вензелев,
аспирант
М.П. Баранова,
д. т. н., доцент
ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ

А.Н. Рогалев,
к. ф.-м. н.,
ФГБНУ Институт вычислительного
моделирования СО РАН

Введение

Известно, что в настоящее время объемы эксплуатируемого электросетевого комплекса России включают около 2,3 млн км линий электропередачи (ЛЭП), 480 тыс. подстанций суммарной трансформаторной мощностью более 750 ГВА. Только в 2022 году ввод трансформаторных мощностей составил 10 715,42 МВА (97% от плана года) и электрических сетей в объеме 31 393,17 км (117% от плана года) [1].

Перед энергетикой страны поставлены задачи перехода к построению модели активно-адаптивных электрических сетей, которые представляют собой совокупность подключенных к генерирующим источникам и потребителям энергии элементов электрических сетей и систем управления, включающих, например, датчики положения и текущих режимных параметров в количестве, достаточном для обеспечения оценки состояния

сети в нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы энергосистемы, с высокой скоростью съема показаний в цифровом виде, а также информационно-технологические и управляющие системы, в том числе программное обеспечение и технические средства адаптивного управления с возможностью воздействия в реальном времени на активные элементы сети и электроустановки потребителей [2].

В реализации активно-адаптивных электрических сетей интенсивно внедряется удаленный мониторинг, а его развитие является актуальной темой исследований и разработок в современной энергетике. Особый интерес представляет мониторинг комплектных распределительных устройств напряжением от 0,4 до 35 кВ. Данные устройства являются неотъемлемой частью большинства электроустановок распределительной сети и играют важную роль в обеспечении эффективной и надежной ее работы. В одно из направлений мониторинга выделяется мониторинг контактных соединений, которые являются одним из ключевых узлов распределительных устройств. Однако, несмотря на их важность, контактные соединения подвержены деградации и износу, что может привести к сбоям в работе электрической сети и ухудшению качества энергоснабжения потребителей.

Традиционные методы мониторинга контактных соединений распределительных устройств включают в себя визуальный осмотр и периодические проверки, проводимые техническим персоналом. Однако такие подходы часто оказываются неэффективными и недостаточно надежными. Во-первых, человеческий фактор может привести к ошибкам при оценке состояния соединений. Во-вторых, периодические проверки не позволяют обнаружить возможные проблемы в режиме реального времени, что может привести к серьезным последствиям, таким как аварии и перебои

в энергоснабжении. В-третьих, не все контактные соединения комплектных распределительных устройств доступны для визуального мониторинга. В-четвертых, методы мониторинга контактов, основанные на температурном анализе, имеют недостаток, выраженный в необходимости протекания токов через контролируемый контакт величиной не менее 0,3–0,5 от номинальной пропускной способности шин, что не всегда реализуемо в реальной эксплуатации.

Одним из основных вызовов в области мониторинга контактных соединений в комплектных распределительных устройствах является необходимость обеспечения надежного и эффективного определения дефекта без физического доступа к контактам. Такой подход позволяет сократить время и затраты на обслуживание, а также предупреждает возможные перерывы в работе сети, что имеет важное значение для обеспечения непрерывности электроснабжения и безопасности электрических систем.

В настоящее время ведутся исследования и разработка новых методов и средств удаленного мониторинга контактных соединений. Использование передовых технологий, таких как датчики, преобразователи, системы искусственного интеллекта и облачные вычисления, позволяет повысить эффективность и надежность мониторинга, а также снизить операционные расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание энергосистем.

В связи с растущими требованиями к надежности, безопасности и эффективности сетей электроснабжения разработка и применение новых методов удаленного мониторинга контактных соединений становится одним из приоритетных направлений исследований и инженерной практики. Отчетливо видна актуальность и важность рассматриваемой темы

в современной технической политике энергетических предприятий.

Цель и задачи

Цель работы состояла в нахождении способа оценки наличия дефекта контактного соединения на основе данных, полученных при удаленном ультразвуковом мониторинге, реализуемом сквозной ультразвуковой эмиссией контактного соединения и измерением температуры контакта.

Исследование является продолжением работы по поиску новых методов удаленной диагностики и мониторинга энергообъектов в части состояния плоскостных контактных соединений шин, использующихся в комплектных распределительных устройствах 0,4–35 кВ [3].

В ранних исследованиях показана перспектива использования ультразвука для неинвазивного определения состояния контактного соединения, а данные, полученные в ходе экспериментов, применены для выявления зависимостей технических параметров контакта с использованием программного обеспечения ЭВМ.

Таким образом, для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить интерполяцию экспериментальных данных и найти аналитические формулы зависимости ультразвукового сигнала от сопротивления и температуры контактного соединения.
2. На основании полученных экспериментальным путем данных выполнить аппроксимацию значений ультразвука с применением нейронной сети. Сравнить полученные данные с результатами, полученными при интерполяции;
3. Выполнить обучение нейронной сети с использованием экспериментальных данных и критерия степени дефекта контактного соединения.

Ключевые слова:
#акустическая эмиссия;
#мониторинг контактов;
#сборные шины;
#ультразвук;
#нейронные сети.



РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Таблица 1

№ п.п.	R, мкОм	УЗС при 30°C, дБ	ΔУЗС при 30°C, дБ	УЗС при 35°C, дБ	ΔУЗС при 35°C, дБ	УЗС при 40°C, дБ	ΔУЗС при 40°C, дБ	УЗС при 45°C, дБ	ΔУЗС при 45°C, дБ	УЗС при 50°C, дБ	ΔУЗС при 50°C, дБ	УЗС при 55°C, дБ	ΔУЗС при 55°C, дБ	УЗС при 60°C, дБ	ΔУЗС при 60°C, дБ
1	20	48,5	0	48,5	0	48	0	47	0	46,5	0	46	0	45	0
2	35	55,5	7	54,5	6	53	5	52,5	5,5	52	5,5	51,5	5,5	50,5	5,5
3	46	59,5	11	59	10,5	58	10	57	10	56,5	10	55,5	9,5	55	10
4	58	64,5	16	63	14,5	62	14	61	14	60,5	14	59,5	13,5	58,5	13,5
5	68	67	18,5	65	16,5	64	16	63	16	62,5	16	62	16	61,5	16,5
6	90	69	20,5	67	18,5	65,5	17,5	64	17	63	16,5	61,5	15,5	61	16
7	100	74	25,5	73	24,5	72	24	70	23	68	21,5	67	21	66	21
8	125	78	29,5	75,5	27	74	26	73,5	26,5	72	25,5	71	25	68	23
9	155	82	33,5	81	32,5	79,5	31,5	78	31	77	30,5	76	30	75,5	30,5
10	170	84	35,5	82	33,5	80,5	32,5	79	32	78	31,5	77	31	76	31

Следует отметить, что исследование фокусировалось на анализе данных и разработке методологии, не затрагивая аспекты концептуального дизайна технических средств мониторинга, таких как общий вид, составные компоненты, устройство передачи данных и т. п.

Функциональная зависимость значений ультразвука от температуры и сопротивления плоскостного контакта

Опытным путем определено, что при сквозной акустической эмиссии поверхностей плоскостного контактного соединения шин величина ультразвукового сигнала (УЗС) на приемном пьезоэлектрическом преобразователе зависит от переходного сопротивления контакта и его температуры. Однако в контексте определения технического состояния контакта прикладное значение заключается не столько в абсолютной величине УЗС, сколько в разнице между его величинами (ΔУЗС),

зафиксированными при начальном монтаже пьезоэлектрических преобразователей, и сигналом, зафиксированным в результате изменения технических характеристик контакта, а именно — при снижении его плотности и изменении температуры. В реальной эксплуатации эти данные будут получены при периодической удаленной ультразвуковой эмиссии контактного соединения.

Экспериментальные данные можно увидеть в таблице 1, где величина R показывает переходное сопротивление контактного соединения и характеризует его плотность. Значения УЗС и ΔУЗС показывают величину ультразвукового сигнала и разницу его значений от начального значения при значениях температуры от 30 до 60 °С.

Для обработки экспериментальных данных применена интегрированная среда MATLAB, выполняющая инженерные и математические расчеты, в которой имеется широкий выбор

средств обработки данных, линейной алгебры, статистики и оптимизации.

Обработка данных выполнена методом поверхности отклика, подходящим для построения аналитических моделей зависимости между переменными. Метод решает задачу отыскания таких величин или уровней независимых переменных (сопротивления и температуры), при которых отклик или зависимая переменная (ультразвуковой сигнал) достигает оптимальных (максимальных или минимальных) значений. При этом устанавливается и обосновывается факт зависимости ультразвукового сигнала от температуры и сопротивления. Методология поверхности отклика основана на исследовании поверхности отклика с помощью ряда небольших полных и неполных факторных экспериментов. Это означает нахождение оптимальной комбинации уровней k количественных факторов, где реализуется пошаговая процедура движения к точке оптимума. Так как вид поверхности отклика

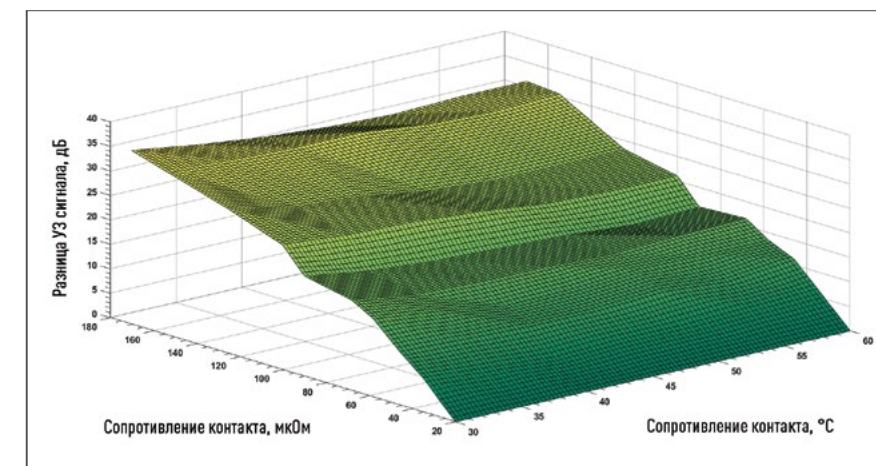
неизвестен, то для этого использовалась в качестве аппроксимации гибкая, плавно изменяющаяся функция. В качестве такой функции применялись полином первого порядка или полином второго порядка, где коэффициенты этого полинома оцениваются с помощью эксперимента. Находилась близкая к оптимуму область, а затем применялись аналитические методы локального представления этой функции в окрестности точки оптимума.

В начале работы метода поверхностей отклика проверяется наличие линейной зависимости, и его точность может быть ограничена в случае сложных нелинейных взаимосвязей [4].

При помощи экспериментальных данных получена поверхность отклика на основе факторных экспериментов MATLAB для полиномиальной модели первой степени, построенной линейной интерполяцией. Сетка

ПОВЕРХНОСТЬ ОТКЛИКА ОТКЛОНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО СИГНАЛА ОТ НАЧАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ВОЗРАСТАНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТА

Рис. 1



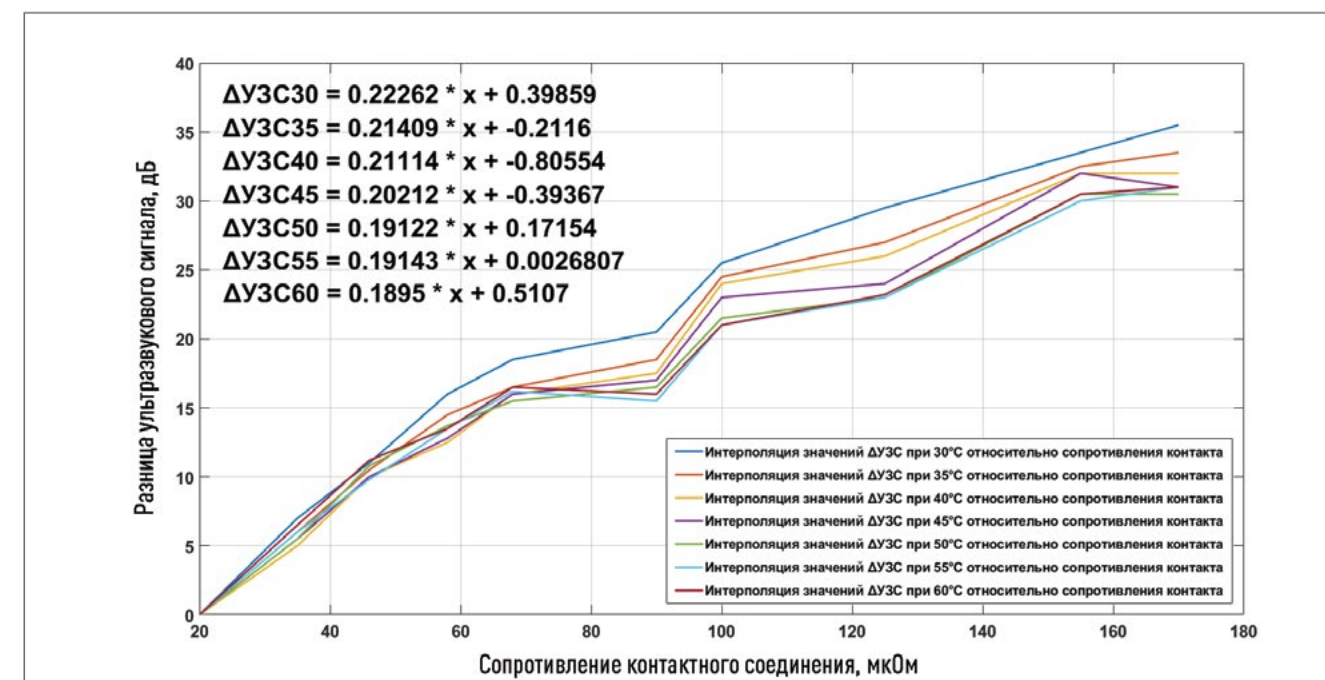
значений отклика имеет размерность 100 × 100. Полученный график показан на рисунке 1.

На графике можно наблюдать зависимость ΔУЗС от температуры

и сопротивления контакта. Возрастание ΔУЗС происходит с увеличением сопротивления контакта. Также необходимо отметить, что снижение значений ΔУЗС, наблюдаемых от возрастания температуры равной

ГРАФИКИ ЛИНЕЙНОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ΔУЗС ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ

Рис. 2



СТРУКТУРА НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АППРОКСИМАЦИИ

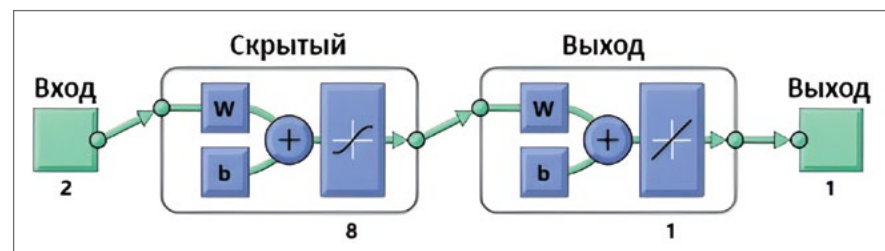


Рис. 3

СТРУКТУРА НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ АППРОКСИМАЦИИ

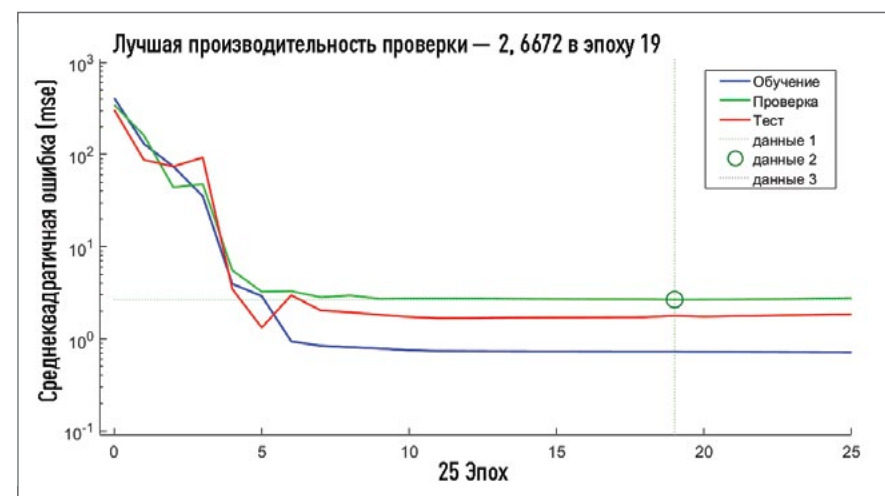


Рис. 4

30 °С к температуре 60 °С, обусловлено незначительным уплотнением контакта в результате термического расширения алюминиевых шин в болтовом соединении.

Для получения аналитической формулы зависимости в разрезе каждой ступени температурного режима от 30 до 60 °С с шагом 5 °С выполнено определение интерполяционных коэффициентов при помощи MATLAB.

Графики линейной интерполяции и аналитические формулы, описывающие функцию зависимости ДУЗС от сопротивления, отражены на рисунке 2.

Для нахождения аналитической функции применен метод наимень-

ших квадратов, который используется для подгонки функции к набору экспериментальных данных так, чтобы минимизировать сумму квадратов разницы между предсказанными и фактическими значениями. Данный метод является предпочтительным с точки зрения минимизации суммы квадратов разницы значений между фактическими и предсказанными значениями, то есть нахождением лучшей аппроксимации зависимости между переменными.

В ходе применения методологии поверхностей отклика были выявлены полиномиальные модели первой степени зависимости между переменными. Однако с целью достижения всестороннего и глубокого понима-

ния структуры данных и возможных нелинейных взаимосвязей проведена дополнительная проверка и аппроксимация с применением нейронной сети.

Аппроксимация функции на основе нейронной сети

Для оценки наличия нелинейных взаимосвязей применен второй метод моделирования — аппроксимация данных в нейросетевом базисе. Формирование входного сигнала нейронных сетей производится в виде канала образов и канала указаний учителя, причем входной сигнал в общем виде является нестационарным случайным сигналом со сложной, неизвестной, многомодальной плотностью распределения вероятностей. Этот вопрос хорошо изложен в работах Галушкина А.И. [5], направленных на активное развитие нейросетевых базисов как логического базиса для решения задач общей и прикладной математики, аналогично булевой логике, которая была основой решения задач на ЭВМ с фоннеймановской архитектурой.

В статье нейросетевой базис означает основу для применения машинного обучения, использующего нейросети в практической задаче, что полностью соответствует целям и задачам работы.

Метод машинного обучения, использующего нейросети, обладает большой гибкостью и способностью устанавливать нелинейные паттерны. Преимуществом данного метода является способность нейронной сети автоматически выявлять сложные взаимосвязи в данных, что делает ее мощным инструментом для обработки информации с большим количеством параметров. Значительным ограничением к применению данного метода может стать то, что нейронные сети могут требовать большого количества данных для качественного обучения, а также сложность

в интерпретации полученных результатов, особенно в случае недостатка теоретического объяснения полученной модели [6].

Аппроксимация будет сводиться к определению функциональной зависимости по имеющемуся набору точек. Функциональную зависимость можно эффективно представить в нейросетевом базисе, т.е. через комбинацию активационных функций нейронных сетей. Для создания нейронной сети применена функция «feedforwardnet» пакета Neural Network Toolbox для MATLAB. Полученная нейронная сеть является сетью прямого распространения с восемью скрытыми нейронами в одном скрытом слое. Структура сети показана на рисунке 3.

Как видно из рисунка, нейронная сеть включает в себя два входных и один выходной параметр. Исходя из того, что задача состояла в аппроксимации функции зависимости полученного ДУЗС относительно значений температуры и сопротивления контакта, то в качестве входных данных применяются значения температуры и переходного сопротивления контактного соединения шин, при которых выполнялись измерения ультразвукового сигнала. В качестве выходных значений задано значение ДУЗС.

Выполнено обучение нейронной сети, результат которого показан на рисунке 4.

На графике видно, что значение 2,6672 показывает на лучший результат производительности (низкое значение ошибки) на проверочном наборе данных, достигнутый в 19-й эпохе обучения. Невысокое значение среднеквадратической ошибки означает, что ошибка в предсказаниях сети на некотором наборе данных низкая. Это указывает на успешную аппроксимацию и хорошее качество обучения нейронной сети.

ГРАФИК АППРОКСИМАЦИИ ЗАВИСИМОСТИ ДУЗС ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ

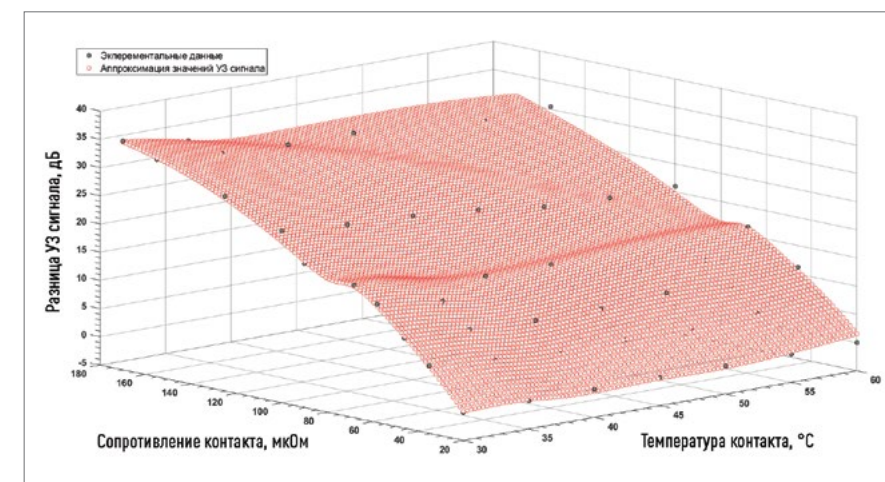


Рис. 5

Далее сформирована равномерно распределенная сетка значений ультразвукового сигнала размерностью 100 × 100 в пределах значений температуры и сопротивления контакта. Величины ультразвукового сигнала аппроксимированы в узлах сетки. Трехмерный график аппроксимации показан на рисунке 5.

В работе используется регрессия как один из основных статистических подходов к построению прогнозных моделей. Применяется один из простейших методов расчета правильности модели — используется ошибка между прогнозируемым значением и фактическим значением. Под прогнозируемыми значениями полагают значения, полученные методом поверхностей отклика и аппроксимации, под фактическими значениями понимаются значения, полученные в результате эксперимента. К вычисленным разностям прогнозируемых и фактических значений применяются метрики средней абсолютной ошибки и среднеквадратичной ошибки.

Для точек $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ и $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ средняя абсолютная ошибка определяется следующим образом:

$$d_{abs}(p, q) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |p_i - q_i|,$$

среднеквадратическая ошибка имеет вид:

$$d_{root}(p, q) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - q_i)^2}.$$

В рассматриваемом плоскостном электрическом контакте p_i — фактические значения, q_i — прогнозируемые значения.

Величины $d_{abs}(p, q)$ и $d_{root}(p, q)$ при аппроксимации данных в нейросетевом базисе имеют значения $7,54 \cdot 10^{-1}$ и $9,77 \cdot 10^{-1}$ соответственно.

При интерполяции данных значение средней абсолютной ошибки равно 1,85, а среднеквадратической ошибки составляет 2,18.

Данные фактических $\{\Delta U_{ЗС}_f\}$, аппроксимированных $\{\Delta U_{ЗС}_a\}$ и интерполированных $\{\Delta U_{ЗС}_i\}$ значений представлены в таблице 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ФАКТИЧЕСКИХ И ПРОГНОЗИРУЕМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ΔУЗС

Таблица 2

№ п.п.	ΔУЗС _ф	ΔУЗС _а	ΔУЗС _и	№ п.п.	ΔУЗС _ф	ΔУЗС _а	ΔУЗС _и	№ п.п.	ΔУЗС _ф	ΔУЗС _а	ΔУЗС _и	№ п.п.	ΔУЗС _ф	ΔУЗС _а	ΔУЗС _и
1	0,00	0,209	4,851	18	27,00	28,088	26,550	35	16,00	15,639	13,350	52	6,00	6,335	6,703
2	7,00	6,907	8,190	19	32,50	32,448	32,972	36	17,00	17,981	17,797	53	9,80	10,186	8,808
3	11,00	11,320	10,639	20	33,50	33,294	36,184	37	23,00	21,759	19,818	54	13,50	14,163	11,106
4	16,00	15,636	13,311	21	0,00	-0,410	3,417	38	24,00	26,523	24,871	55	16,20	16,631	13,020
5	18,50	18,264	15,537	22	5,00	5,676	6,584	39	32,00	30,762	30,935	56	15,50	18,482	17,231
6	20,50	20,986	20,434	23	10,00	9,420	8,907	40	31,00	32,220	33,967	57	21,00	20,204	19,146
7	25,50	23,954	22,661	24	12,50	13,049	11,441	41	0,00	-0,193	3,996	58	23,00	24,481	23,931
8	29,50	29,144	28,226	25	16,00	15,358	13,552	42	5,50	6,347	6,864	59	30,00	30,024	29,674
9	33,50	33,783	34,905	26	17,50	18,349	18,197	43	10,80	10,423	8,968	60	31,00	32,001	32,546
10	35,50	35,330	38,244	27	24,00	22,343	20,308	44	13,70	14,135	11,262	61	0,00	1,560	4,301
11	0,00	0,253	4,070	28	26,00	27,549	25,587	45	15,50	16,291	13,175	62	6,50	7,086	7,143
12	6,00	6,425	7,282	29	32,00	31,378	31,921	46	16,50	18,115	17,381	63	11,20	10,520	9,228
13	10,50	10,347	9,637	30	32,00	32,078	35,088	47	21,50	20,556	19,294	64	13,50	13,944	11,502
14	14,50	14,226	12,206	31	0,00	-0,133	3,649	48	23,00	25,385	24,074	65	16,50	16,236	13,397
15	16,50	16,730	14,347	32	5,50	6,240	6,681	49	30,50	30,639	29,811	66	16,00	17,523	17,566
16	18,50	19,757	19,057	33	10,00	9,981	8,904	50	30,50	32,285	32,679	67	21,00	19,920	19,461
17	24,50	23,489	21,197	34	12,80	13,495	11,329	51	0,00	0,491	3,831	68	23,20	24,413	24,198

Близость полученных численных результатов также отражают графики сравнения 10 тыс. прогнозируемых значений, изображенные на рисунке 6. В итоге получено решение задачи плоскостного электрического контакта с хорошей точностью, что имеет большое практическое значение.

На графиках можно наблюдать значительное сходство полученных данных при различных методах моделирования. Это сходство указывает на эффективность каждого из представленных подходов — аппроксимации с использованием нейронной сети и линейной интерполяции в приближении зависимости между ультразвуковым сигналом, температурой и сопротивлением контактного соединения. Методы поверхности отклика и аппроксимации в нейросетевом базисе являются мощными сред-

ствами обработки и анализа данных. Оба подхода имеют свои уникальные преимущества, а значительное сходство графиков указывает на способность полученных моделей адекватно описать и предсказать изменения состояния контакта на основе имеющихся данных.

Оценки средней абсолютной ошибки и среднеквадратической ошибки, а также графики полученных зависимостей подтверждают надежность и применимость обеих моделей при анализе зависимости ΔУЗС от сопротивления и температуры контакта. Это также открывает возможность для дальнейших исследований, включающих анализ технического состояния контактного соединения на основе изменения значения ΔУЗС и температуры контактного соединения.

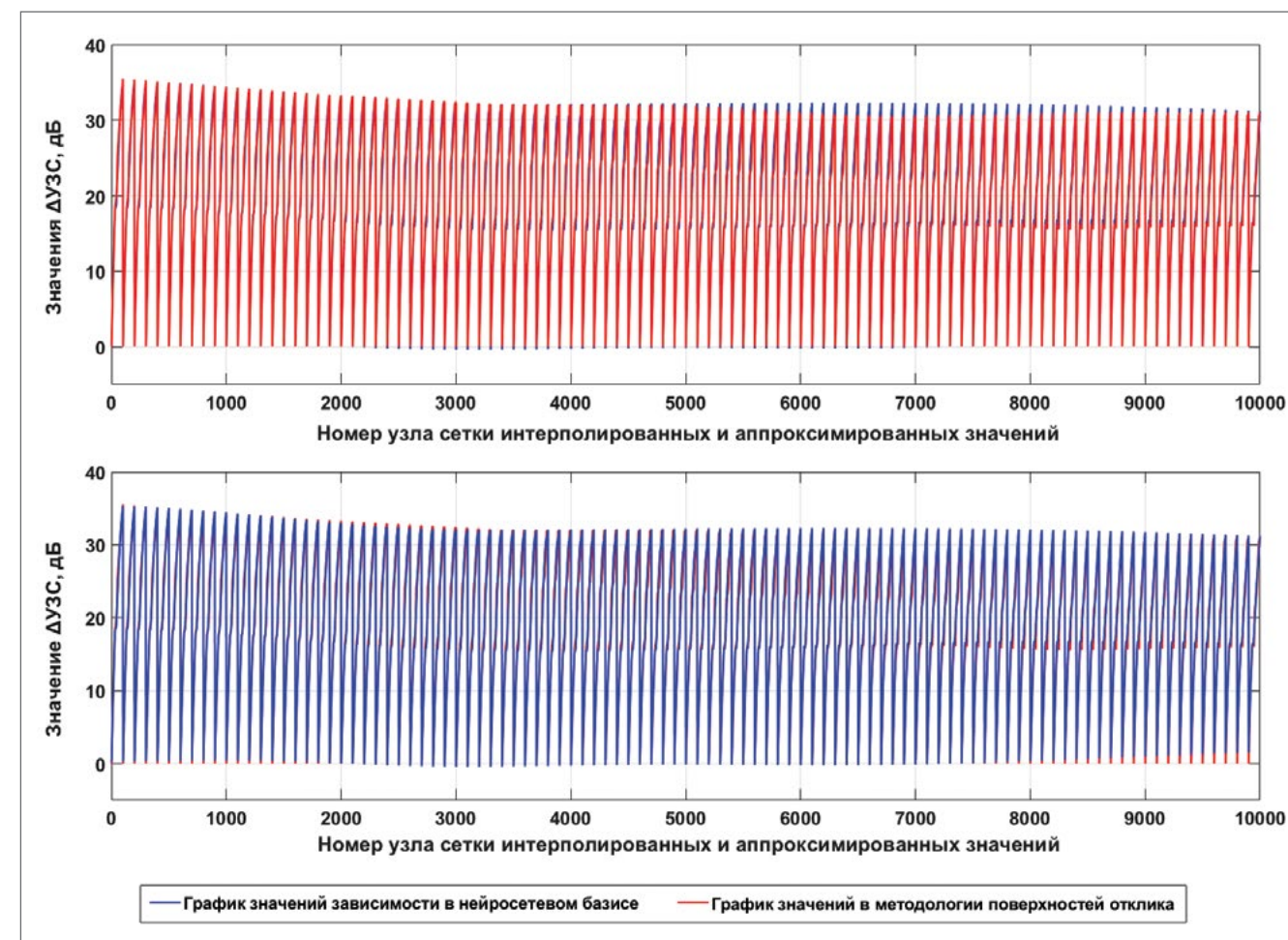
Полученные данные при аппроксимации возможно применять при формировании базы данных для обучения нейронной сети с целью предсказания значений ΔУЗС, выходящих за пределы экспериментальных данных более 60 °С и 170 мкОм.

Определение состояния контактного соединения по ультразвуковому сигналу и температуре контакта с применением нейронной сети

Как известно, сопротивление контакта не должно превышать более чем в 1,2 раза сопротивление измеренного на участке шины аналогичного сечения и протяженностью 0,7–0,8 м. Измеренное сопротивление на шине АДЗ1 сечением 80 × 10 мм и длиной 0,8 м равно 18,5 мкОм, при этом значение сопротивления контактного

СРАВНЕНИЕ ГРАФИКОВ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ И ИНТЕРПОЛЯЦИИ ЗАВИСИМОСТИ ΔУЗС ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Рис. 6



соединения составляет 20 мкОм. Переходное сопротивление контакта не превышает 22,2 мкОм, что соответствует требованиям норм правил устройства электроустановок.

Так как в реальной эксплуатации инструментальный контроль контактных соединений с применением миллиметров выполняется персоналом, эксплуатирующим электроустановки, то обнаруженные дефекты устраняются на месте. В то же время в процессе мониторинга имеет место временная задержка с момента обнаружения дефекта до его устранения. Поэтому необходимо предусмотреть

уровни, характеризующие наличие и степень развития дефекта контактного соединения (уровни дефекта), определяемые на основании измерения ΔУЗС контакта и используемые с целью определения оперативности принятия мер для его устранения.

Для обработки данных применена нейронная сеть прямого пространства с десятью скрытыми нейронами в одном скрытом слое, которая обучена на значениях, полученных экспериментальным путем. В качестве вводных данных применены значения ΔУЗС и температуры контакта, для выходных данных

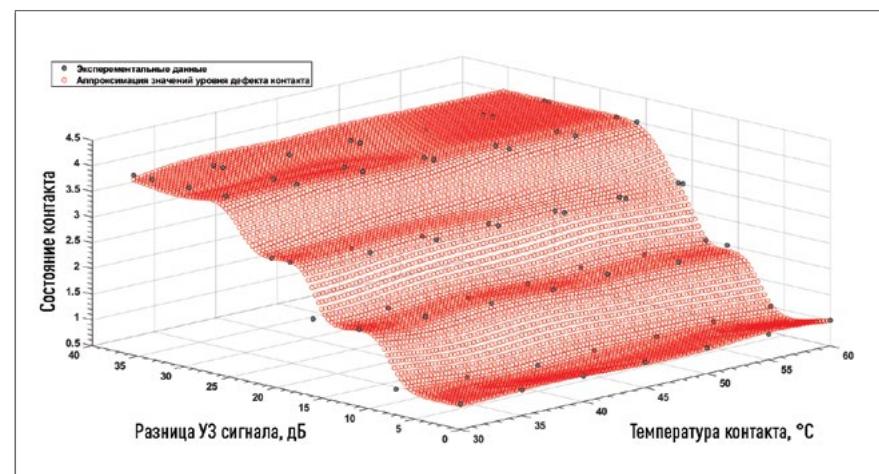
применены уровни дефекта контакта от 1 до 4, обозначающие:

1 уровень — уровень нормального состояния контакта, верхний порог значения которого эквивалентен уровню ΔУЗС при 22,2 мкОм;

2 уровень — начальная степень неисправности, верхняя граница порога ΔУЗС эквивалентна 58 мкОм;

3 уровень — развившийся дефект, требующий устранения при ближайшем плановом отключении электроустановки. Верхняя граница ΔУЗС эквивалентна 90 мкОм;

ГРАФИК АППРОКСИМАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ УРОВНЕЙ ДЕФЕКТА КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ



ПРИ ОЦЕНКЕ РАБОТЫ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗНАЧЕНИЙ СТЕПЕНИ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТА НА ОСНОВЕ ПОКАЗАНИЙ УЛЬТРАЗВУКА И ТЕМПЕРАТУРЫ КОНТАКТА ВИДНО, ЧТО ПОЛУЧЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЯВЛЯЮТСЯ ДЕСЯТИЧНЫМИ И НЕ ОКРУГЛЯЮТСЯ ДО ЦЕЛОГО ЗНАЧЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ОЦЕНКИ ОТКЛОНЕНИЯ ПОЛУЧЕННОГО РЕЗУЛЬТАТА ОТ ВВОДНЫХ ДАННЫХ

4 уровень — аварийный дефект, требующий немедленного устранения. Верхняя граница порога ДУЗС не ограничена.

Значения ДУЗС на уровнях дефекта от 2 до 4 приняты равномерно распределенными по сетке экспериментальных значений переходного сопротивления контакта с целью выполнения аппроксимации и оценки адекватности модели для возможности применения машинного обучения при определении степени развития дефекта в процессе мониторинга контактов.

При обучении лучший результат производительности показан в 15-ю эпоху из 21, а его значение равно 0,034963. Низкая среднеквадратическая ошибка указывает на успешное обучение и дает основание полагать, что качество обучения нейронной сети хорошее и аппроксимация значений выполнена успешно.

Результаты аппроксимации значений уровня дефекта контактного соедине-

ния с использованием нейронной сети и график сравнения значений, полученных при проверке, представлены на рисунках 7 и 8 соответственно.

При оценке работы нейронной сети по определению значений степени развития дефекта на основе показаний ультразвука и температуры контакта видно, что полученные значения являются десятичными и не округляются до целого значения с целью оценки отклонения полученного результата от вводных данных. Как видно из графика аппроксимации, показанного на рисунке 7, график имеет «ступени», характеризующие степень развития дефекта, а его значения достаточно близко аппроксимированы к вводным данным. Также на графике, показанном на рисунке 8, можно наблюдать сравнение вводных данных и аппроксимированных значений, которое показывает высокую точность разработанной модели, поскольку наблюдается незначительное отклонение между экспериментальными данными и значениями, предсказанными нейронной сетью. Предполагается, что в процессе работы по определению степени развития дефекта контакта полученные десятичные значения будут округляться до целых значений от 1 до 4 в автоматическом режиме.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что разработанная модель нейронной сети представляет собой эффективный инструмент для определения степени развития дефектов на основе ультразвуковых и термических данных и может успешно применяться в дальнейших научных и практических работах.

Заключение

Таким образом, в ходе работы решены задачи интерполирования экспериментальных данных, полученных при акустической эмиссии плоскостных контактных соединений шин.

Осуществлена аппроксимация значений ультразвукового сигнала с применением нейронной сети. Полученные результаты сопоставлены с результатами приближения по методу поверхностей отклика, что позволило оценить эффективность обоих методов моделирования.

Выполнено обучение нейронной сети с использованием критерия степени дефекта контактного соединения, эквивалентного переходному сопротивлению контакта. Данный этап позволил разработать инструмент для оценки состояния плоскостных контактов шин на основе данных акустической эмиссии.

В целом, результаты исследования подчеркивают потенциал нейронных сетей в области ультразвуковой эмиссии контактных соединений. Разработанный метод позволяет эффективно определять текущее состояние контактов на основе измеряемых значений ультразвука и температуры контакта.

Необходимо отметить, что одним из наиболее важных аспектов текущих исследований является потенциал для предсказания будущего технического состояния контактов. Это открывает новые перспективы для создания систем мониторинга, способных не только определять текущее состояние, но и прогнозировать будущие деградационные изменения в контактах. Данный подход имеет важное практическое значение, поскольку предсказание будущих состояний контактов позволит заблаговременно предупреждать о возможных неполадках и предоставит возможность планировать мероприятия по ремонту контактных соединений до возникновения отказов оборудования.

При этом разработка более сложных моделей машинного обучения и внедрение их в системы мониторинга может дать импульс к созданию новых систем или модернизации суще-

ствующих интеллектуальных систем управления, которые способны автоматически реагировать на ухудшение технического состояния компонентов оборудования, например, плоскостных контактов шин в ячейках комплектных распределительных устройств, что поспособствует снижению рисков в работе электроэнергетических систем, повысит эффективность и надежность электроэнергетической инфраструктуры, а также снизит эксплуатационные расходы. Показанные перспективы отвечают основным положениям концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Министерство энергетики Российской Федерации: официальный сайт. 2023. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/537> (дата обращения: 01.11.2023).
2. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. [Электронный ресурс] // ПАО «Россети»: официальный сайт. 2023. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (дата обращения: 01.11.2023).
3. Вензелев Р.В., Баранова М.П. Диагностика неразрываемого поверхностного контактного соединения ультразвуковым сигналом // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. Красноярск: БИК СФУ, 2023. С. 278–286.
4. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. СПб.: Питер, Изд. группа BHV, 2004. 848 с.
5. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия — Телеком, 2012. 496 с.
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

Для цитирования: Вензелев Р.В., Баранова М.П., Роголев А.Н. Применение нейронных сетей и методологии поверхностей отклика для прогноза показателей плоскостного электрического контакта шин // Энергия единой сети. 2024. № 1 (72). С. 20–29.

ГРАФИК СРАВНЕНИЯ ВВОДНЫХ ДАННЫХ И ЗНАЧЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ АППРОКСИМАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ УРОВНЕЙ ДЕФЕКТА КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

