

Н.К. Полуянович, М.Н. Дубяго

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ
СЕТЕЙ**

Статья посвящена исследованиям термофлуктуационных процессов в соответствии с теорией теплопроводности для решения задач диагностики и прогнозирования остаточного ресурса изоляционных материалов на основе неразрушающего температурного метода. Обоснована актуальность задачи создания нейросетей для оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температуры жил СКЛ в режиме реального времени на основе данных системы температурного мониторинга, с учетом изменения токовой нагрузки линии и внешних условий теплоотвода. Рассматриваются вопросы создания диагностики и прогнозирования термофлуктуационных процессов изоляционных материалов силовых кабельных линий (СКЛ) электроэнергетических систем на основе таких методов искусственного интеллекта, как нейронные сети и нечеткая логика. Разработана нейросеть для определения температурного режима токоведущей жилы силового кабеля. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик распределений температуры, при этом исследовались различные нагрузочные режимы работы и функции изменения тока кабеля. При анализе данных было определено, что максимальное отклонение данных, полученных от нейросети от данных обучающей выборки, составило менее 10% что является вполне приемлемым результатом. Для повышения точности использовалось большое количество входных и выходных данных при обучении сети, а также некоторая доработка ее структуры. Разработанное цифровое аппаратное устройство осуществляет измерение температуры поверхности и окружающей среды силового кабеля, а затем в режиме реального времени позволяет выполнять расчет его внутренних температур и решать задачи раннего выявления развивающихся в нем повреждений. Основная область применения разработанной нейросети для определения температурного режима токоведущей жилы заключается в диагностике и прогнозировании ресурса электроизоляции (ЭИ) силового кабеля. Модель позволяет оценивать текущее состояние изоляции и прогнозировать остаточный ресурс СКЛ. Разработка интеллектуальной системы прогнозирования температуры жилы СКЛ способствует планированию режимов работы электросети с целью повышения надежности и энергоэффективности их взаимодействия с объединенной энергосистемой.

Искусственный интеллект; нейронные сети; термофлуктуационные процессы; изоляционные материалы; прогнозирование; надежность систем энергоснабжения.

N.K. Poluyanovich, M.N. Dubyago

**FORECASTING THE CABLE LINES RESOURCE USING THE METHOD
OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS**

The article is devoted to the research of thermal fluctuation processes in accordance with the theory of thermal conductivity to solve the problems of diagnosis and prediction of the residual life of insulating materials on the basis of non-destructive temperature method. The urgency of the problem of creating neural networks for assessing the capacity, calculation and prediction of the temperature of PCL cores in real time based on the data of the temperature monitoring system, taking into account changes in the current load of the line and the external conditions of the heat sink. The problems of creation of diagnostics and forecasting of thermofluctuation processes of insulating materials of power cable lines (PCL) of electric power systems on the basis of such methods of artificial intelligence as neural networks and fuzzy logic are considered. A neural network was developed to determine the temperature regime of the current-carrying core of the power cable. A comparative analysis of the experimental and calculated characteristics of the temperature distributions was carried out, and various load modes and functions of the cable current

change were investigated. When analyzing the data, it was determined that the maximum deviation of the data obtained from the neural network from the training sample data was less than 10%, which is an acceptable result. To improve the accuracy, a large amount of input and output data was used in the training of the network, as well as some refinement of its structure. The developed digital hardware device measures the temperature of the surface and the environment of the power cable, and then in real time allows you to calculate its internal temperatures and solve the problem of early detection of damage developing in it. The main field of application of the developed neural network for determining the temperature regime of the current-carrying conductor is the diagnosis and prediction of the electrical insulation resource (EIR) of the power cable. The model allows you to evaluate the current state of isolation and predict the residual life of the PCL. The development of an intelligent system for predicting the temperature of the PCL core contributes to the planning of the power grid operation modes in order to improve the reliability and energy efficiency of their interaction with the combined power system.

Artificial intelligence; neural networks; thermal fluctuation processes; insulation materials; forecasting; reliability of power supply systems.

Введение и постановка задачи. Увеличение объема потребляемой энергии связано с развитием и появлением новых энергоёмких производств. В таких эксплуатационных условиях высокий физический износ оборудования распределительно- сетевого комплекса (около 69 %, из них сверхнормативного и аварийного использования линий электропередач – 67 % и 26 % соответственно) приводит к значительным показателям аварийности в энергетическом секторе (за первые 5 месяцев 2017 г. произошло 4513 аварий в электрических сетях напряжением 110 кВ и выше [Отчет о результатах достижения ключевых целей и задач Минэнерго России в первом полугодии 2017 года. В процессе эксплуатации изоляция СКЛ подвергаются тепловым, электрическим, химическим, механическим, атмосферным и другим видам воздействий, в результате чего происходит изменение её электрических свойств и, как следствие, некоторые изменения претерпевают и технические характеристики изоляционных материалов [1, 2]. В исследование характера отказов, разработку и внедрение методов контроля и диагностики изоляции по тепловым процессам СКЛ, большой вклад внесён такими учёными, как Золотарев В.В., Меркулов В. И., Набока Б. Г., Зализный Д.И., и др. Однако процесс старения изоляции с учетом комбинации факторов в полном объёме до сих пор не изучен. Важной характеристикой силовых кабельных линий (СКЛ) систем электроснабжения является нагрузочная способность, определяемая тепловым режимом, по которой рассчитывается площадь поперечного сечения и их пропускная способность [3, 4]. Расчёт пропускной способности необходим и осуществляется при проектировании кабельных линий (КЛ). Однако использование даже самых точных методик не позволяет учесть на практике все нюансы условий прокладки и погодные условия, которые весьма существенно влияют на температурный режим работы КЛ. В связи с этим, при проектировании КЛ стремятся выбирать коэффициенты с определённым запасом, поэтому в ряде случаев кабели оказываются недогруженными, а иногда работают на пределе температурного режима [5]. Одним из решений указанной проблемы является мониторинг температуры кабеля во время работы. Применение интеллектуальной системы прогнозирования приведет к повышению общей надежности энергосети и повышению энергоэффективности функционирования энергетического сектора, уменьшению влияния человеческого фактора и снижению аварийных ситуаций.

Задачами исследования являются: – разработка интеллектуальной системы прогнозирования температуры жилы СКЛ для планирования режимов работы электросети с целью повышения надежности и энергоэффективности их взаимодействия с объединенной энергосистемой; – В связи с неустойчивостью энергосети при изменении режимных параметров работы, процесс прогнозирования пропу-

ской способности сетей электроснабжения и обеспечение режимных параметров становится труднореализуемой задачей. Системы прогнозирования строятся на базе искусственного интеллекта с применением методов машинного обучения. Наиболее перспективным представляется метод искусственных нейронных сетей (ИНС), а для их обучения могут быть использованы в том числе открытые базы данных мониторинга энергетических систем и погодных явлений.

Прогнозирования термофлуктуационных процессов. Ресурс изоляционных материалов зависит от таких параметров как температура, ток, влажность [6–12.], поэтому необходимо исследования температурного поля в сечении СКЛ, рис.1. Низкая теплопроводность изоляции кабеля рис.1, приводит к высокому температурному градиенту, поэтому температура наиболее нагретого участка в сечении кабеля (вблизи жилы) значительно отличается от измеренной температуры, а в переходных режимах эта разница может увеличиваться в несколько раз. Поэтому актуальна задача создания нейросетей для оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температуры жил СКЛ в режиме реального времени на основе данных системы температурного мониторинга, с учетом изменения токовой нагрузки линии и внешних условий теплоотвода. Помимо оценки пропускной способности к задачам мониторинга теплового режима относят оценку температуры жилы в режиме реального времени и своевременное предотвращение токовых перегрузок СКЛ, требуется прогнозирование температур жил кабелей в режиме реального времени. Последнее означает, что необходимо постоянно прогнозировать нагрев кабелей на некоторое время вперёд, причем такое, чтобы была возможность принять меры по снижению нагрузки КЛ.

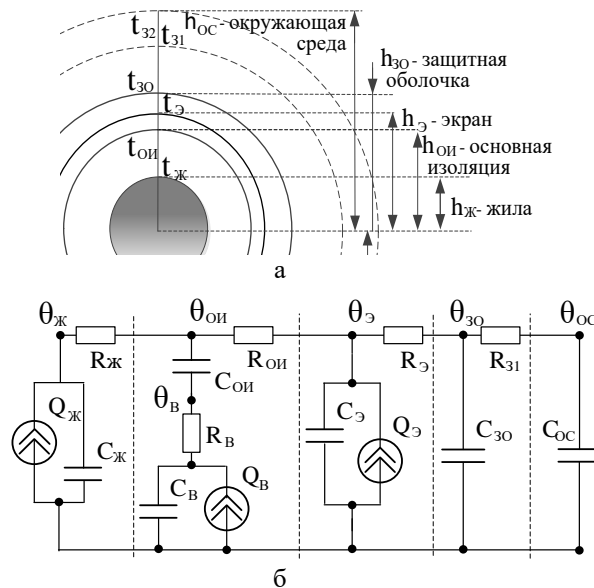


Рис. 1. Сечение кабеля и его эквивалентная тепловая схема замещения

Прогнозирование температуры жилы СКЛ необходимо для правильного прогнозирования электрической нагрузки энергосистем. Прогнозирования электрической нагрузки производится с упреждением от 10–15 мин до 1 ч (для взаиморасчетов между субъектами федерального оптового рынка электроэнергии и мощности) – оперативное прогнозирование; с упреждением на сутки, неделю, месяц – краткосрочное прогнозирование; с упреждением на месяц, квартал, год, несколько лет – долгосрочное прогнозирование. На основе прогнозирования температуры

жилы СКЛ рассчитываются исходные и оптимальные режимы электроэнергетических систем, оцениваются их надежность, экономичность, качество поставляемой электроэнергии и т. п. Задача прогнозирования опирается на сложные математические или эмпирические (интуитивные) методы поиска закономерностей в рассматриваемом временном интервале.

При составлении прогноза температуры жилы СКЛ энергосистемы учитываются: график электрических нагрузок текущего дня и соответствующего дня прошлого года; прогноз погоды (средняя температура наружного воздуха на предстоящие сутки; продолжительность светового дня; возможность атмосферных осадков или облачности; предложения энергосистем по обеспечению подачи электроэнергии потребителям; режим работы наиболее крупных потребителей. Для прогнозирования температуры жилы СКЛ а значит нагрузки в электроэнергетической системе можно воспользоваться методами описанными в [13]. Качество прогноза во многом зависит от выбранной математической модели [14]. Основным недостатком существующих методов прогноза нагрузки состоит в необходимости построения модели нагрузки, т. е. зависимости нагрузки от влияющих факторов, и постоянного ее уточнения. Другой недостаток состоит в неточном установлении соотношения между входными и выходными переменными, так как зависимости между ними нелинейные. Входные переменные представляют собой название дня недели, ретроспективные данные о нагрузке, информацию о температуре окружающего воздуха, влажности, программах телепередач и др. Выходные переменные – это предстоящая нагрузка на каждый час суток. Искусственная нейронная сеть [15] способна установить сколь угодно сложные соотношения между различными оперативно вводимыми, непрерывно изменяющимися исходными данными, что позволяет ей достаточно точно предсказать будущую нагрузку. ИНС – это совокупность нейронов, связанных между собой определенным образом.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются [16–19]. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами.

Для определения температуры токоведущей жилы на основе температур внешней изоляции и окружающей среды было решено выбрать рекуррентную сеть, которая по принципу действия схожа с сетью Эльмана. Причина выбора обусловлена необходимостью прогнозирования нелинейных изменений температуры.

Разработка ИНС. Возможность обучения – одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Построение нейронной сети решается в два этапа: выбор типа (архитектуры) нейронной сети и подбор весов (обучение) нейронной сети. На первом этапе выбираются: • типы нейронов, которые необходимо использовать (число входов, передаточные функции); • способы соединения нейронов между собой; • входные и выходные сигналы нейронной сети. Существует несколько десятков различных нейросетевых архитектур, причем эффективность многих из них доказана математически. Наиболее популярные и изученные архитектуры – это многослойный перцептрон, нейронная сеть с общей регрессией, нейронные сети Кохонена и др. Для решения задачи с помощью ИНС необходимо выбрать конфигурацию нейронной сети и сформировать окружение, в котором будет работать данная нейронная сеть. Под формированием окружения понимается реализация следующих этапов: • создание обучающего задачника; • обучение нейронной сети; • тестирование ИНС. В качестве обучающей выборки (задачника) были использованы результаты измерения динамики температуры на поверхности защитной оболочки силового кабеля в широком диапазоне значений токов жилы силового кабеля от 450, А до 650, А. Разработанная конфигурация ИНС для прогнозирования температуры жилы СКЛ приведена на рис. 2.

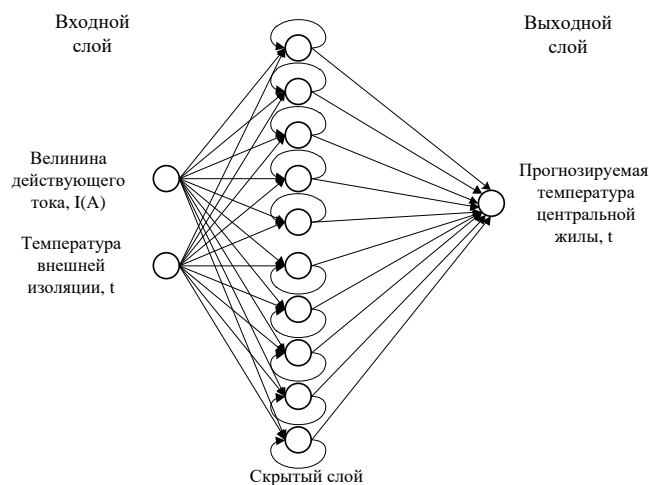


Рис. 2. Структура нейронной сети

Она представляет собой рекуррентную сеть. Во входном слое сети находятся 2 нейрона (количество входных переменных), в скрытом слое – 10 (определены экспериментальным путем при настройке сети), в выходном – 1 (соответствует количеству необходимых выходных данных). В качестве входных параметров выбраны ток, проходящий по жиле и температура внешней изоляции кабеля. Выходным параметром является температура токоведущей жилы.

Обучение происходит следующим образом (рис. 3). Имеется некоторая база данных (задачник), содержащая примеры. Предъявляя их на вход нейронной сети, получаем от нее некоторый ответ, не обязательно верный. Известен и верный (желаемый) ответ. Вычисляя разность между желаемым и реальным ответами сети, получаем вектор ошибки.

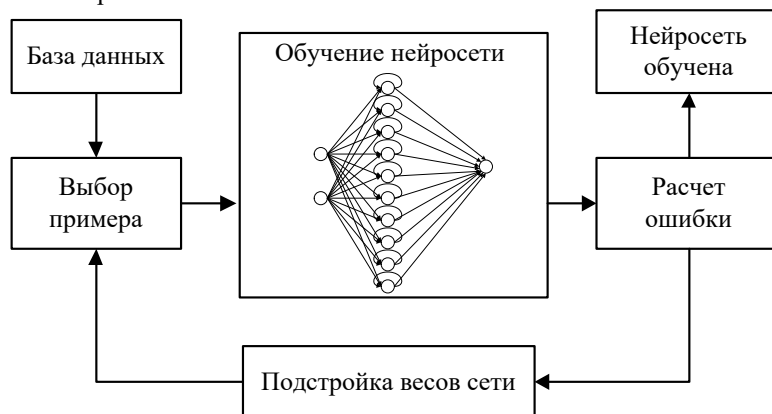


Рис. 3. Процесс обучения нейронной сети.

Алгоритм обратного распространения ошибки – это набор формул, который позволяет по вектору ошибки вычислить требуемые поправки для весов нейронной сети. Один и тот же пример может предъявляться нейронной сети много раз. После многократного предъявления примеров веса нейронной сети стабилизируются, причем нейронная сеть дает правильные ответы на все (или почти все) при-

меры из базы данных. В таком случае говорят, что «нейронная сеть выучила все примеры», «нейронная сеть обучена» или «нейронная сеть натренирована». В программных реализациях можно видеть, что в процессе обучения величина ошибки (сумма квадратов ошибок по всем выходам) постепенно уменьшается. Когда величина ошибки достигает нуля или приемлемого малого уровня, тренировку останавливают, а полученную нейронную сеть считают натренированной и готовой к применению с использованием новых данных. Блок-схема алгоритма обучения искусственной нейронной сети представлена на рис. 4.

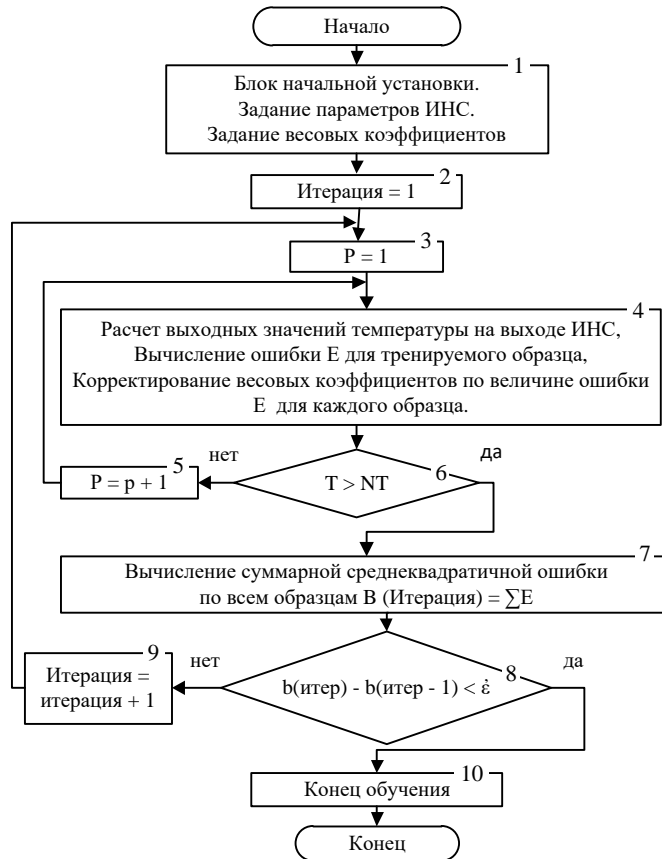


Рис. 4. Блок-схема алгоритма обучения ИНС

Далее вычисляется ошибка для каждого тренируемого образца

$$E_p = 0,5(d_k - O_k)^2, \quad (1)$$

где d_k – желаемое значение температуры на жиле; O_k – расчетное значение ($P_{\text{прог}}$).

Расчет ошибки позволяет определить погрешность в выходных данных полученных из работы ИНС относительно экспериментальных параметров. После расчета градиентных спусков в пространстве весов W_{ji} и W_{kj} и их корректировки [20] вычисляется суммарная ошибка по всем образцам (блок 7) и производится проверка выполнения условия точности расчетов (блок 8). В случае выполнения условия точности расчетов процесс обучения заканчивается, в противном случае – процесс обучения повторяется.

Важно отметить, что вся информация, которую нейронная сеть имеет о задаче прогнозирования, содержится в наборе примеров. Поэтому качество обучения нейронной сети напрямую зависит от количества примеров в обучающей выборке, а также от того, насколько полно эти примеры описывают данную задачу. В работе для полноценной тренировки нейронной сети использовалось по каждому исследуемому образцу двадцать примеров в каждом по четыреста значений.

В статье моделирование нейронной сети для прогнозирования температуры жилы кабеля осуществлено с помощью Neural Network Toolbox в системе Matlab.

Исследованы термофлуктуационные процессы в силовом кабеле АПв Пу г-1х30/25-10 при реальной диаграмме действующего значения тока жилы кабеля, табл.1 и разработанной модели прогноза с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС) на ретроспективных данных температур исследуемого кабеля за 2015–2019 годы. Для каждого значения тока жилы бралось по 400 точек температуры $\theta_{з.о}$, $\theta_{о.с}$. В статье приведены результаты прогноза температуры жилы кабеля ($\theta_{ж}$), с помощью ИНС, для исследуемого образца № 1.

Таблица 1

Результаты прогнозирования температуры $\theta_{ж}$ образца № 1

Номер образца	Ток жилы, А	Средняя температура токоведущей жилы, t°С	Средняя спрогнозированная температура токоведущей жилы, t°С	Средняя величина ошибки прогноза, t°С	Средняя величина ошибки прогноза, %
1	440	34,22	34,47195	1,045001	3,031455
	450	38,75	42,567	3,817004	8,967048
	455	38	41,10783	3,107835	7,560201
	460	39,155	42,80692	3,879702	9,063258
	470	38,28	38,79928	2,442176	6,294385
	475	35,03	36,72509	1,695086	4,615608
	480	37,47	36,26801	1,201989	3,314185
	485	36,125	36,16032	0,609145	1,684567
	490	36,435	38,53838	2,103384	5,457894
	495	32,785	37,63504	4,850041	12,88704
	500	36,185	36,09096	1,1344	3,143169
	510	42,59582	39,47206	3,155809	7,995045
	515	37,095	37,93254	0,837542	2,207977
	525	39,655	37,49795	3,234812	8,626637
	530	37,375	37,97731	0,724587	1,907947
	540	47,065	43,94306	3,121937	7,104504
580	45,845	48,68854	2,843538	5,840262	
600	48,47	48,55757	1,442092	2,969861	

Данные по температуре $\theta_{з.о}$, $\theta_{о.с}$ –защитной оболочки, окружающей среды (рис. 1), получены в ходе работы с реальными образцами силового кабеля АПв Пу г-1х30/25-10. Средняя ошибка прогноза температуры жилы кабеля $\theta_{ж}$ при различных токах жилы (табл. 1) не превышает 10 %, что свидетельствует о возможности применения метода искусственных нейронных сетей для целей прогнозирования температуры жилы кабеля по температуре на поверхности $\theta_{з.о}$, рис. 1,б.

Построены графики экспериментальной температуры исследуемых образцов и графики построенные на основе данных обучающей выборки и нейросети (рис. 5–8) на основе целевых и полученных данных для анализа погрешности нейросети при расчетах.

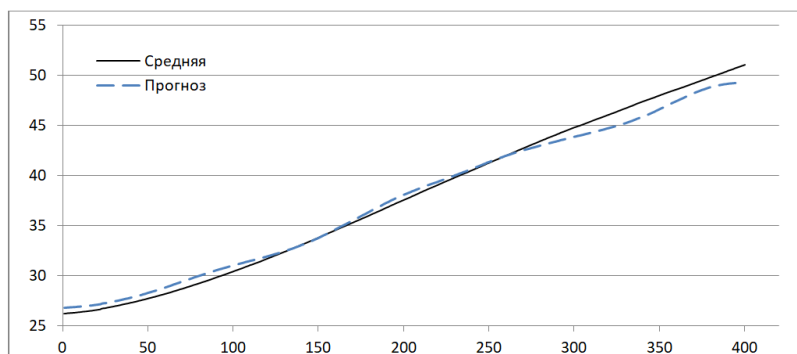


Рис. 5. График экспериментальной температуры образца № 1 и график построенный на основе данных обучающей выборки и нейросети

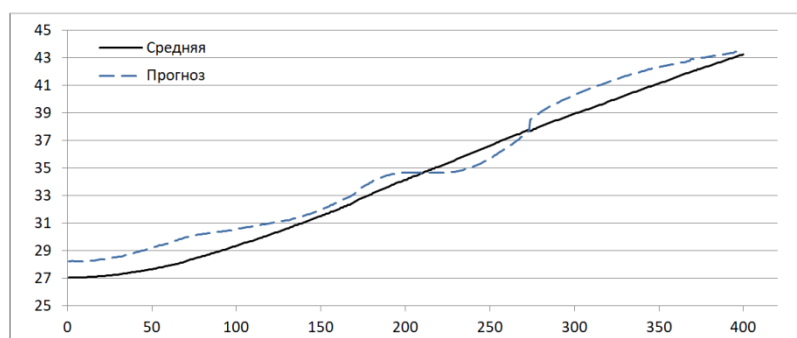


Рис. 6. График экспериментальной температуры образца № 2 и график построенный на основе данных обучающей выборки и нейросети

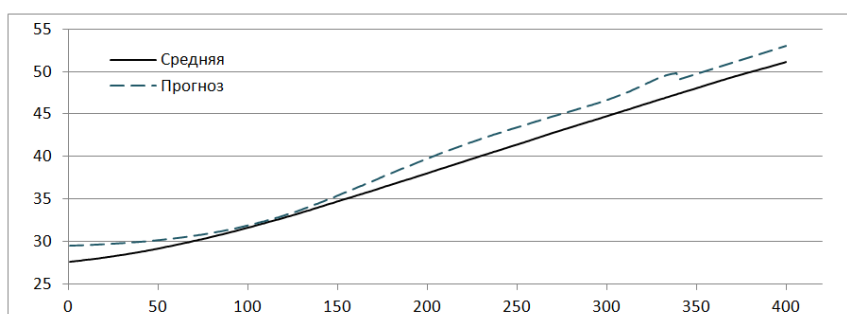


Рис. 7. График экспериментальной температуры образца № 3 и график построенный на основе данных обучающей выборки и нейросети

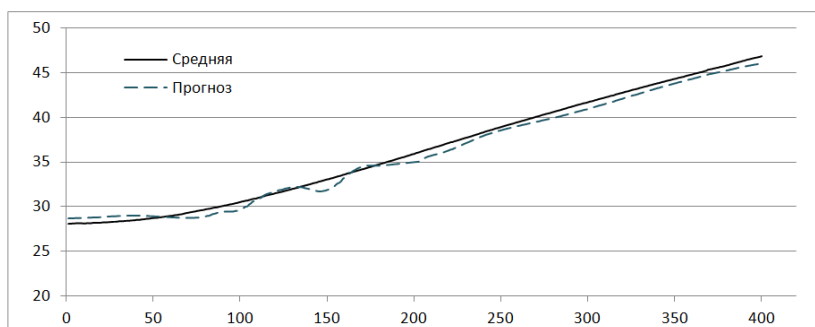


Рис. 8. График экспериментальной температуры образца № 4 и график построенный на основе данных обучающей выборки и нейросети

Выводы. Разработана нейросеть для определения температурного режима токоведущей жилы силового кабеля. При анализе данных было определено, что максимальное отклонение данных, полученных от нейросети от данных обучающей выборки, составило менее 10 % что является вполне приемлемым результатом. Для повышения точности, необходимо использовать большее количество входных и выходных данных при обучении сети, а также некоторая доработка ее структуры. Основная область применения разработанной нейросети для определения температурного режима токоведущей жилы заключается в диагностике и прогнозировании ресурса ЭИ силового кабеля. Модель позволяет оценивать текущее состояние изоляции и прогнозировать остаточный ресурс СКЛ. Цифровое аппаратное устройство осуществляет измерение температуры его поверхности и температуры окружающей среды, а затем в режиме реального времени выполняет расчет его внутренних температур и решает задачи раннего выявления развивающихся в нем повреждений.

Работа выполнена при поддержке гранта: Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии, № ВнГр-07/2017-15.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Полуянович Н.К.* Разработка алгоритма релейной защиты распределительной сети на основе математической модели // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 1 (90). – С. 240-245.
2. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system // 2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013) Applied Mechanics and Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications, 2014. – Vol. 448-453. – P. 2455-2460.
3. *Дубяго М.Н.* Разработка модели старения и определение остаточного ресурса изоляции силовых кабелей // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 107-114.
4. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пишихонов В.Х.* Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 7 (168). – С. 230-237.
5. *Дубяго М.Н., Полуянович Н.К.* Метод селекции сигнала ЧР с помощью Вейвлет-преобразования // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 2 (139). – С. 99-104.
6. *Полуянович Н.К., Дубяго М.Н.* Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system // 2013 4th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (ICAMME 2013), October 11-12, 2013, Singapore, Applied Mechanics and Materials. Vols. 459. Trans Tech Publications, Switzerland, 2014. – P. 70-75.

7. *Dubyago Marina N., Poluyanovich Nikolay K.* Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges // *Advances in Materials Science and Applications*. – Mar. 2015. – Vol. 4, Iss. 1. – P. 23-32.
8. *Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K.* Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // *International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2015)*, September 26-27, 2015 in Changsha, China. Published by Atlantis Press. – P. 49-54. – ISSN: 2352-5401.
9. *Dubyago M.N. & Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 229. – 2017.
10. *Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K.* Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration // *2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies (AMRMT 2017) 2–5 August 2017, Phuket, Thailand* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 229. 012036/. – ISSN:1757-899X.
11. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies* 18(16): e3. ж. SJR SCImago Journal & Country Rank.
12. *Dubyago Marina N. and Poluyanovich Nikolay K.* Estimation of Insulating Materials Depreciation and Forecasting the Residual Cable Resource Considering the Current Core Temperature // *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*. – 2019. – Vol. 7, No. 1. – P. 415-420.
13. *Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б.* Прогнозирование электрических нагрузок ЭЭС с использованием методов искусственного интеллекта // *Сб. трудов Российского национального симпозиума по энергетике*. Казань, 10–14 сент. 2001 г. – М.: КГЭУ, 2001. – С. 103-106.
14. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс. – 2-е изд. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
15. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 452 с.
16. *Лавренко Ю.Н.* Исследование и разработка комбинированных нейросетевых технологий для повышения эффективности безопасной маршрутизации информации в сетях связи: дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГТУ, 2014. – С. 17-21.
17. *Короткевич М.А., Курачинский В.В.* Прогнозирование электрической нагрузки энергосистемы на следующие сутки с использованием метода искусственных нейронных сетей // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2010. – № 2. – С. 5-11.
18. *Финаев В.И.* Модели систем принятия решений. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – 118 с.
19. *Гайдук А.Р.* Системы автоматизированного управления. Примеры, анализ и синтез. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – 414 с.
20. *Шутенко О.В., Загайнова А.А., Сердюкова Г.Н.* Анализ влияния условий и режимов эксплуатации на техническое состояние основной изоляции высоковольтных вводов различной конструкции // *Электротехника и электромеханика*. – 2019. – № 1. – С. 57-65.

REFERENCES

1. *Poluyanovich N.K.* Razrabotka algoritma releynoy zashchity raspredelitel'noy seti na osnove matematicheskoy modeli [Development of relay protection algorithm for distribution network based on mathematical model], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 1 (90), pp. 240-245.
2. *Dubyago M.N.* Mathematical description of interaction of the elements in the power network system, *2013 International Conference on Renewable Energy and Environmental Technology (ICREET 2013) Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2014, Vol. 448-453, pp. 2455-2460.
3. *Dubyago M.N.* Razrabotka modeli stareniya i opredelenie ostatochnogo resursa izolyatsii silovykh kabeley [Development of a model of aging and determination of residual resource of insulation of power cables], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 4 (153), pp. 107-114.

4. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Pshikhopov V.Kh.* Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy [Evaluation and prediction of the insulation materials of power cable lines], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 7 (168), pp. 230-237.
5. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Metod selektsii signala CHR s pomoshch'yu Veyvlet-preobrazovaniya [The method of selection of signal ChR with the help of Wavelet transform], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 2 (139), pp. 99-104.
6. *Poluyanovich N.K. Dubyago M.N.* Study of characteristics of partial discharge for assessment of condition of electrical insulating materials of power supply system, *2013 4th International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering (ICAMME 2013), October 11-12, 2013, Singapore, Applied Mechanics and Materials. Vols. 459.* Trans Tech Publications, Switzerland, 2014, pp. 70-75.
7. *Dubyago Marina N., Poluyanovich Nikolay K.* Analysis of Insulation Materials of Cable Systems by Method of Partial Discharges, *Advances in Materials Science and Applications*, Mar. 2015, Vol. 4, Iss. 1, pp. 23-32.
8. *Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K.* Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration, *International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (AEECE 2015), September 26-27, 2015 in Changsha, China. Published by Atlantis Press, P.49-54. ISSN:2352-5401.*
9. *Dubyago M.N. & Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 229, 2017.
10. *Dubyago M.N. and Poluyanovich N.K.* Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration, *2017 2nd International Conference on Advanced Materials Research and Manufacturing Technologies (AMRMT 2017) 2–5 August 2017, Phuket, Thailand IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 229. 012036/. ISSN:1757-899X.
11. *Dubyago M.N., Poluyanovich N.K.* Thermal processes of the isolating materials in problems of nondestructive diagnostics of the main and distributive power stations. EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies 18(16): e3. ж. SJR SCImago Journal & Country Rank.
12. *Dubyago Marina N. and Poluyanovich Nikolay K.* Estimation of Insulating Materials Depreciation and Forecasting the Residual Cable Resource Considering the Current Core Temperature, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 2019, Vol. 7, No. 1, pp. 415-420.
13. *Shumilova G.P., Gotman N.E., Startseva T.B.* Prognozirovanie elektricheskikh nagruzok EES s ispol'zovaniem metodov iskusstvennogo intellekta [Forecasting of electric loads of EPS using artificial intelligence methods], *Sb. trudov Rossiyskogo natsional'nogo simpoziuma po energetike. Kazan', 10–14 sent. 2001 g.* [Proceedings of the Russian national Symposium on energy, Kazan, 10-14 September. 2001]. Moscow: KGEU, 2001, pp. 103-106.
14. *Khaykin S.* Neyronnye seti: polnyy kurs [Neural networks: full course]. 2nd ed. Moscow: Izd. dom «Vil'yams», 2006, 1104 p.
15. *Rutkovskaya D., Piliński M., Rutkovskiy L.* Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]: transl. from Polish I.D. Rudinskogo. Mjscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2008, 452 p.
16. *Lavrenkov Yu.N.* Issledovanie i razrabotka kombinirovannykh neyrosetevykh tekhnologiy dlya povysheniya effektivnosti bezopasnoy marshrutizatsii informatsii v setyakh svyazi: diss. ... kand. tekhn. nauk [Research and development of combined neural network technologies to improve the efficiency of secure routing of information in communication networks: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow: MGTU, 2014, pp. 17-21.
17. *Korotkevich M.A., Kurachinskiy V.V.* Prognozirovanie elektricheskoy nagruzki energosistemy na sleduyushchie sutki s ispol'zovaniem metoda iskusstvennykh neyronnykh setey [Forecasting the electrical load of the power system for the next day using the method of artificial neural networks], *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG.* [Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2010, No. 2, pp. 5-11.

18. *Finaev V.I. Modeli sistem prinyatiya resheniy [Models of decision-making systems].* Taganrog: Izd-vo TRTU, 2005, 118 p.
19. *Gayduk A.R. Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya. Primery, analiz i sintez [Automated control systems. Examples, analysis and synthesis].* Taganrog: Izd-vo TRTU, 2006, 414 p.
20. *Shutenko O.V., Zagaynova A.A., Serdyukova G.N. Analiz vliyaniya usloviy i rezhimov ekspluatatsii na tekhnicheskoe sostoyanie osnovnoy izolyatsii vysokovol'tnykh vvodov razlichnoy konstruksii [Analysis of the influence of operating conditions and modes on the technical condition of the main insulation of high-voltage inputs of various designs].* *Elektrotehnika i elektromekhanika [Electrical engineering and electromechanics]*, 2019, No. 1, pp. 57-65.

Статья рекомендована к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Финаев.

Полюянович Николай Константинович – Южный федеральный университет; e-mail: nik1-58@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 89185693365; кафедра электротехники и мехатроники.

Дубяго Марина Николаевна – e-mail: w_m88@mail.ru; тел.: 89281758225; кафедра электротехники и мехатроники; аспирант.

Poluyanovich Nikolay Konstantinovich – Southern Federal University; e-mail: w_m88@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185693365; the department of electric technics and mechatronics.

Dubyago Marina Nikolaevna – e-mail: w_m88@mail.ru; phone: +79281758225; the department of electrical engineering and mechatronics; graduate student.

УДК 451.51.02.07

DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-62-71

А.Г. Хандизод, Р.Р. Дешмух, И.Б. Аббасов, Ч.Н. Махендер

РАЗРАБОТКА НЕИЗМЕННОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ БИБЛИОТЕКИ PALMPRINT С ПОМОЩЬЮ SPD4 СПЕКТРОРАДИОМЕТРА SPES4

Биометрия – это метод расчета и измерения тела, биометрия, используемая в информатике для идентификации личности людей в группе. В биометрии существует ряд методов, доступных для автоматической проверки и идентификации человека. Инструмент аутентификации включает в себя проверку того, какие люди знают пароли, ПИН-коды, какие люди имеют токены, смарт-карты и какие имеют черты лица, распознавание рук, отпечатки пальцев, геометрию рук, рисунок радужной оболочки глаза. По сравнению с другими биометрическими характеристиками отпечатки пальцев являются более точными, надежными, изображения отпечатков пальцев дают больше информации по сравнению с отпечатками пальцев. HyperSpectral Palmprint система распознавания является многообещающей биометрической технологией, которая получила чрезвычайно большой интерес исследований. В последние десятилетия было предложено и построено много различных алгоритмов и систем. Несмотря на то, что был достигнут большой успех в исследованиях отпечатков пальцев, тем не менее, точность и механизм подделки в некоторых случаях ограничены, поскольку функция отпечатков пальцев может быть аналогичной для данного спектрального анализа; HyperSpectral Palmprint является хорошим методом распознавания для решения этой проблемы, он может предоставить более точную информацию при различном освещении в короткие сроки. Были проведены исследования, которые используют изображения для идентификации и аутентификации людей, поэтому изображение человека легко взломать с помощью резинового цемента, желатинового носителя и т.д. В этой статье мы решаем эту проблему с помощью спектроскопического устройства, которое генерирует спектральные сигнатуры ладоней, и эти спектральные сигнатуры являются уникальными для каждого чело-